

THESES

présentées

A LA FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE NANCY

pour obtenir le Diplôme de

DOCTEUR - INGENIEUR

par

Gérard LEVY

1ère Thèse

INFLUENCE DE CERTAINES PROPRIETES DU SOL SUR LA

DENSITE D'ENRACINEMENT DE L'EPICEA COMMUN (Picea excelsa Link)

ET DU PIN SYLVESTRE (Pinus sylvestris L.)

2ème Thèse

Proposition donnée par la Faculté

Soutenues le 29 Novembre 1967 devant la Commission d'Examen

JURY

Président : M. Ph. DUCHAUFOR

Examineurs : M. F. MANGENOT
M. M. BONNEAU

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555020_0003

T H E S E S
présentées
A LA FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE NANCY
pour obtenir le Diplôme de
DOCTEUR - INGENIEUR
par

Gérard LEVY

1ère Thèse

INFLUENCE DE CERTAINES PROPRIETES DU SOL SUR LA
DENSITE D'ENRACINEMENT DE L'EPICEA COMMUN (*Picea excelsa* Link)
ET DU PIN SYLVESTRE (*Pinus sylvestris* L.)

2ème Thèse

Proposition donnée par la Faculté

Soutenues le 29 Novembre 1967 devant la Commission d'Examen

JURY

Président : M. Ph. DUCHAUFOUR
Examineurs : M. F. MANGENOT
M. M. BONNEAU

ANNEE SCOLAIRE 1967-1968

Doyen : M. AUBRY

Assesseur : M. GAY

Doyens honoraires : MM. CORNUBERT - DELSARTE - ROUBAULT

Professeurs honoraires : MM. RAYBAUD - LAFFITTE - LERAY - JULY -
LAPORTE - EICHHORN - GODEMENT - DUBREUIL - L. SCHWARTZ -
DIEUDONNE - DE MALLEMANN - LONGCHAMBON - LETORT - DODE -
GAUTHIER - GOUDET - OLMER - CORNUBERT - CHAPELLE - GUERIN -
WAHL -

Maitres de conférences honoraires : MM. LIENHART - PIERRET -

Professeurs

MM. DELSARTE	Analyse supérieure
ROUBAULT	Géologie
CAPELLE	Mécanique rationnelle
VEILLET	Biologie animale
BARRIOL	Chimie théorique
BIZETTE	Physique
GUILLIEN	Electronique
GIBERT	Chimie physique
LEGRAS	Mécanique rationnelle
BOLFA	Minéralogie
NICLAUSE	Chimie
FAIVRE	Physique appliquée
AUBRY	Chimie minérale
COPPENS	Radiogéologie
DUVAL	Chimie
FRUHLING	Physique
HILLY	Géologie
LE GOFF	Génie chimique
SUHNER	Physique expérimentale
CHAPON	Chimie biologique
HEROLD	Chimie minérale industrielle
SCHWARTZ B.	Exploitation minière

⊕	MALAPRADE	Chimie
	MANGENOT	Botanique
	GAYET	Physiologie
	HADNI	Physique
⊕	BASTICK	Chimie
	DUCHAUFOR	Pédologie
	GARNIER	Agronomie
	NEEL	Chimie organique industrielle
	BERNARD	Géologie appliquée
⊕	CHAMPIER	Physique
⊕	GAY	Chimie biologique
	STEPHAN	Zoologie
⊕	CONDE	Zoologie
⊕	WERNER	Botanique
	EYMARD	Calcul différentiel et intégral
	LEVISALLES	Chimie organique
Mme	HERVE	Méthodes mathématiques de la physique
	FELDEN	Physique
⊕	GOSSE	Mécanique physique
⊕	DAVOINE	Physique (E.N.S.M.I.M.)
	HORN	Physique 1er cycle
⊕ Mme	LUMER	Mathématiques
	N...	Chimie biologique
	N...	Mécanique appliquée

(⊕ Professeur titulaire à titre personnel)

Maitres de conférences

Mme BASTICK	Chimie P.C. Epinal
MM. GUDEFIN	Physique
ROCCI	Géologie
VUILLAUME	Psychophysiologie
FRENTZ	Biologie animale
MARI	Chimie (I.S.I.N.)
AUROUZE	Géologie
DEVIOT	Physique du solide
FLECHON	Physique P.C.
Melle HUET	Mathématiques C.B.G.
VIGNES	Métallurgie
BALESSENT	Thermodynamique chimique appliquée (E.N.S.I.C.)
BLAZY	Minéralogie appliquée (E.N.S.G.)
JANOT	Physique P.C. Epinal
JACQUIN	Pédologie et chimie agricoles
MAINARD	Physique M.P.
CACHAN	Entomologie appliquée (E.N.S.A.)
MARTIN	Chimie F.C.
PAULMIER	Mécanique expérimentale
PROTAS	Minéralogie
JCZEFOWICZ	Physico-chimie
JURAIN	Géologie C.B.G.
RIVAIL	Chimie appliquée (C.U.C.E.S.)
VILLERMAUX	Génie chimique
METCHE	Biochimie appliquée (Brasserie)
PAIR	Mathématiques appliquées
BAUMANN	Physique 1er cycle
DURAND	Physique
HUSSON	Physique (I.S.I.N.)
N...	Mécanique des fluides (I.S.I.N.)
N...	Mécanique (I.S.I.N.)
N...	Probabilités et statistiques
N...	Mathématiques
N...	Mathématiques P.C.
N...	Mathématiques C.B.G.
N...	Physiologie animale
N...	Mathématiques M.F.
N...	Exploitation minière (E.N.S.M.I.M.)

L'auteur remercie :

Monsieur le Professeur DUCHAUFOUR,
qui, par son enseignement, puis ses précieux conseils,
a permis la réalisation de ce travail, et a accepté, malgré
de lourdes tâches, de présider le Jury.

Monsieur le Professeur MANGENOT,
pour l'avoir fait bénéficier de ses remarques judicieuses
et précises , et avoir bien voulu juger ce travail.

Monsieur BONNEAU, Directeur de la station de recherches sur les sols
forestiers du C.N.R.F.,
qui a suggéré ce travail, puis l'a guidé à chacune de ses
étapes avec une continuelle attention; il a apporté une aide
considérable à sa réalisation.

Monsieur TOMASSONE, chargé de recherches à la station de biométrie
du C.N.R.F., pour avoir conseillé efficacement et
programmé les analyses statistiques.

Les Chefs des centres de gestion, les ingénieurs et les préposés de
l'Office national des forêts de Commercy, Epinal-plaine,
Nancy, Saint-Avold, Saint-Dié, Verdun-est, en particulier
Messieurs FONDEUR, LAPEYRE, MORMICHE, LEBLAN,
LHOTE, qui l'ont guidé dans le choix des stations et lui
ont procuré l'aide pratique indispensable à l'accomplissement
de ce travail.

Le personnel de la station de recherches sur les sols forestiers du
C.N.R.F., en particulier Madame SALMON et Mademoiselle
BITSCH pour leur participation à l'analyse des sols.

L'Institut National de la Recherche Agronomique,
au sein duquel ce travail a pu s'accomplir.

SOMMAIRE

<u>INTRODUCTION</u>	<u>Pages</u>
A) Avantages d'un bon enracinement.....	4
1) Avantages pour la production.....	4
2) Avantages pour le sol.....	5
B) Influence des propriétés du sol sur l'enracinement	5
C) But de ce travail.....	7
 <u>1ère PARTIE : MATERIEL D'ETUDE ET METHODES</u> <u>UTILISEES.....</u>	9
<u>CHAPITRE I</u> - Matériel d'étude.....	10
<u>CHAPITRE II</u> - Méthodes de mesure de l'enracine- ment et des propriétés du sol.....	12
1) Mesure de l'enracinement.....	12
1) Choix de la grandeur à mesurer.....	12
2) Prélèvement des racines sur le terrain.....	13
3) Identification des racines de Résineux.....	14
4) Classes de diamètre et densité d'enracine- ment.....	15
II) Mesure des propriétés du sol.....	16
1) Propriétés déterminées sur le terrain.....	16
2) Propriétés déterminées au laboratoire.....	17
<u>CHAPITRE III</u> - Les stations.....	21
 <u>2ème PARTIE : CORRELATIONS ENTRE L'ENRACINE-</u> <u>MENT ET LES PROPRIETES DU SOL ET PRE-</u> <u>VISION DE L'ENRACINEMENT</u>	24
<u>CHAPITRE I</u> - Relations entre les propriétés du sol et l'enracinement.....	26
1) Graphiques Enracinement - Propriétés du sol.....	26
1) Variables fournissant une droite limite intéressante pour les 2 essences.....	26

2) Variables ne fournissant de droite limite intéressante que pour le Pin.....	28
3) Variables ne fournissant de droite limite intéressante pour aucune des 2 essences...	28
4) La profondeur.....	28
II) Les coefficients de corrélation entre les propriétés du sol et l'enracinement.....	30
1) Données de base pour les calculs statistiques	30
2) Les coefficients de corrélation entre les propriétés du sol et l'enracinement.....	31
3) Les coefficients de corrélation partielle....	36
4) Les composantes principales.....	38
<u>CHAPITRE II - Prévion de l'enracinement.....</u>	42
I) Prévion à l'aide des droites limites.....	42
II) Prévion à l'aide des formules fournies par l'analyse statistique.....	44
1) L'analyse de régression progressive.....	45
2) Formules utilisées à titre d'exemple.....	45
III) Synthèse des 2 méthodes de prévion de l'enracinement	49
1) Précision des 2 méthodes.....	49
2) Explication des enracinements "aberrants".	49
CONCLUSION de la 2ème Partie.....	51
<u>3ème PARTIE : LES ENSEMBLES DE PROFILS ET LEUR ENRACINEMENT.....</u>	53
<u>CHAPITRE I - Le groupement des profils.....</u>	54
I) Propriétés importantes.....	54
II) Liaison de ces propriétés avec la roche-mère et la pédogénèse.....	55
1) L'indice α	55
2) La texture.....	58
3) Le calcium.....	58
4) Conclusion.....	60

III) Les ensembles de sols.....	61
<u>CHAPITRE II</u> : L'enracinement dans chaque ensemble de sols.....	64
I) Sols formés sur Terra Fusca.....	64
II) Sols à calcaire actif.....	66
III) Sols formés sur limons.....	69
IV) Sols formés sur roche-mère argileuse épaisse.....	72
V) Sols formés sur roche-mère provenant, au moins en partie du grès vosgien.....	74
CONCLUSION de la 3ème Partie.....	82
<u>CONCLUSIONS GENERALES</u>	84
I) Liaisons entre les propriétés du sol et l'enracinement...	84
II) Influence de la pédogénèse sur l'enracinement.....	91
III) Comparaison des enracinements de l'Epicéa et du Pin Sylvestre.....	92
IV) Conclusions pratiques.....	94
<u>ANNEXE 1</u>	97
Description des Profils	98
<u>ANNEXE 2</u>	126
BIBLIOGRAPHIE.	

INTRODUCTION

Le but essentiel fixé par l'homme à la forêt est la production de bois. Le sol ayant une influence primordiale sur la croissance des arbres, la tâche essentielle en matière de pédologie forestière consiste à étudier les relations entre le sol et la production.

A - AVANTAGES D'UN BON ENRACINEMENT -

Les racines constituent un intermédiaire entre le sol et le bois fourni; de plus elles sont le support de l'arbre. Aussi leur importance apparaît-elle considérable. Un enracinement profond et dense dans les différents horizons prospectés est intéressant pour la production forestière; de plus il contribue à maintenir un sol en bon état.

1) Avantages pour la production :

Ils sont les suivants, par rapport à un enracinement plus superficiel et moins dense :

- la résistance au chablis est accrue
- la quantité d'éléments minéraux à la disposition des arbres est supérieure, ce qui améliore leur alimentation (BLANCHET et CHAUMONT, 1964)
- la densité du système racinaire et sa profondeur augmentent non seulement la quantité totale d'eau utilisable (BETHLAMY 1963, BLANCHET et CHAUMONT 1964), mais aussi la proportion de l'eau facilement utilisable par rapport à la totalité de cette eau utile (HALLAIRE 1963) (l'eau facilement utilisable est l'eau utilisable sans limitation de l'évapotranspiration, donc de la croissance). Cette alimentation accrue en eau augmente l'évapotranspiration réelle et la photosynthèse, ce qui se traduit par une plus forte production (BOUCHET 1963), et peut permettre à l'arbre de résister à une sécheresse particulièrement forte et prolongée. Cette eau profonde peut aussi favoriser, chez certaines espèces, l'alimentation azotée à partir des couches superficielles, même si celles-ci sont sèches (MAERTENS 1964).

- Tout cela se traduit par une meilleure vigueur (chez les arbres fruitiers : HENIN et GRAS 1962) et une production forestière accrue (HOLSTENER-JORGENSEN 1959, HORTON 1958, MELZER 1964).

2) Avantages pour le sol :

Un enracinement profond et dense sera également favorable au sol car il s'oppose à sa dégradation en maintenant, ou même en créant, sur une grande épaisseur des propriétés physiques (porosité etc..) favorables (BONNEAU 1963); en effet :

- Il y a fourniture de matière organique lors de la décomposition des racines.
- les bases sont ramenées en surface par le jeu du cycle biologique; cela favorise la vie bactérienne dans le sol et s'oppose à la formation de composés organiques solubles qui dégraderaient le sol.
- les racines s'opposent à l'hydromorphie en prélevant l'eau qui sature la macroporosité et en créant, dans la masse des horizons Bg de pseudogley, des zones d'écoulement vertical.

Un enracinement trop superficiel favoriserait donc une dégradation du sol qui, en s'accroissant de plus en plus, deviendrait très défavorable aux générations suivantes d'arbres. Un peuplement à enracinement superficiel peut fournir une production intéressante, mais il risque dans le même temps de compromettre l'avenir de la forêt.

B. INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS DU SOL SUR L'ENRACINEMENT

Il est donc fort intéressant qu'un peuplement soit bien enraciné. Mais de quoi dépend cet enracinement ? Il est généralement admis que chaque espèce végétale, qu'elle soit herbacée ou ligneuse, a une tendance naturelle, génétique, d'enracinement; en particulier, certaines espèces tendraient à s'enraciner en profondeur, d'autres non. Mais les propriétés du sol interviendraient pour modifier plus ou moins cette tendance naturelle. Il s'agit principalement des propriétés physiques, mais les propriétés chimiques joueraient également un rôle.

Une nappe d'eau limite l'extension en profondeur des racines; HOLSTENER - JORGENSEN (1961) l'a constaté pour l'épicéa, FAYLE (1965) pour l'Erable à sucre; ainsi, un mauvais drainage limite l'enracinement des arbres (MUELLER et CLINE, 1959).

Une faible perméabilité est néfaste à l'enracinement des arbres fruitiers; mais il en est de même de la trop forte perméabilité de certaines couches sableuses (RADYNYK, 1964).

Une faible porosité et un manque d'aération s'opposent au développement des racines de diverses espèces (KRAMER, 1956; KREUTZER, 1961; TAYLOR et GARDNER, 1963; SUZAKI et SANEMATSUBU). Cela s'est vérifié pour le Pin Sylvestre mais non pour Hêtre (Mac QUEEN, 1966). Une porosité inférieure à 40% arrête la croissance des jeunes plants d'Epicéa, mais non celle de chêne pédonculé (LEIBUNGUT 1963). Les galeries laissées par d'anciennes racines sont favorables (TAYLOR et GARDNER 1963) ainsi que les fentes du sol et les trous de lombrics (RADYNN 1964). Le diamètre des pores intervient : les jeunes racines ne pénètrent pas à travers des pores rigides de diamètre inférieur à celui de l'extrémité de la racine, ce qui peut expliquer les différences de pénétration des diverses espèces à travers des horizons compacts (VIERSUM 1957).

Une forte densité apparente peut limiter l'enracinement des arbres (MUELLER et CLINE 1959, RADYNYK 1964).

La résistance mécanique apparaît comme un facteur très important s'opposant à la pénétration des racines. De nombreux auteurs l'ont constaté : HIDDING et al. (1960), FAYLE (1965) pour l'Erable à Sucre, DUCHAUFLOIR (1953) et KOTLER (1962) pour l'Epicéa, MAERTENS (1964) pour certaines plantes herbacées. TAYLOR et Al. (1963-1964) ont montré que le développement des racines dépend de la densité apparente et de l'humidité du sol, mais encore bien plus de la résultante, à chaque instant, de ces 2 variables : la résistance à la pénétration.

La densité des racines peut dépendre aussi de la texture du sol (HORTON 1958, pour Pinus ponderosa, et GRAS 1961, pour le pommier).

Une mauvaise structure peut favoriser l'hydromorphie et empêcher ainsi le développement racinaire (KOWALCZYKI et CZARNOTA 1962; GRAS 1962, chez le pêcher).

La stabilité structural est un facteur important. GRAS (1961) a constaté que l'enracinement du pommier, dans la sarthe, était bon pour $\log 10 I_s \leq 1,30$, moyen avec danger d'asphyxie pour $\log 10 I_s$ compris entre $1,30$ et nul pour $\log 10 I_s > 1,60$.

Les propriétés physiques dans leur ensemble apparaissent finalement particulièrement importantes (DAY 1962, pour l'Epicéa de Sitka, HOCHTANNER et BEITSCHER 1964, pour le Pin Sylvestre).

Mais certains auteurs signalent le rôle des propriétés chimiques :

De fortes quantités d'aluminium mobile dans le sol inhibent le développement des racines (JUSTE 1964).

KERN, MOLL et BRAUN (1961) ont constaté, pour des peuplements mixtes d'Épicéa, Sapin et Hêtre, que la longueur totale des racines très fines d'un profil est d'autant plus faible que le sol est plus riche en éléments nutritifs. Mais, dans un sol donné, il y a une corrélation positive entre la densité des racines très fines de chaque horizon et sa teneur en potassium ; la courbe de la variation de l'enracinement avec la profondeur s'ajuste à la courbe de la teneur en éléments nutritifs totaux, et souvent aussi à la courbe du potassium.

Le rôle de la richesse chimique du sol a été aussi mis en évidence par MAERTENS (1964) pour des plantes herbacées et MAC QUEEN (1966) (corrélation positive entre l'indice de fertilité et le poids de racines absorbantes pour le Pin sylvestre, négative pour le Hêtre).

Quant à ZÖTTL (1964), il a constaté qu'une fertilisation complète (N, P, K, Ca) se traduisait par une augmentation du poids de racines fines d'Épicéa.

C - BUT DE CE TRAVAIL -

Il est donc incontestable que les propriétés du sol, surtout les propriétés physiques, déterminent, au moins en partie, l'enracinement. Le but de ce travail est d'étudier systématiquement et quantitativement les liaisons existant entre les propriétés du sol et la densité de la prospection racinaire de certaines essences intéressantes pour le reboisement, afin de déterminer les propriétés les plus importantes pour cet enracinement ; cela permettra éventuellement de prévoir l'enracinement de ces essences dans un sol donné (donc de guider son choix), et peut-être même d'agir sur le sol pour accroître la densité ou la profondeur des racines.

Dans la première partie, nous indiquerons les méthodes employées : peuplements et stations choisies, mesure de l'enracinement et des propriétés du sol.

La deuxième partie sera surtout analytique. Chaque horizon sera considéré comme une entité propre, représentée par ses propriétés chiffrées (enracinement, propriétés physiques, propriétés chimiques). Nous mettrons en corrélation les diverses propriétés des horizons et les densités des racines correspondantes, afin de dégager les propriétés les

plus importantes pour l'enracinement. Nous examinerons ensuite si l'ensemble des résultats ainsi obtenus peut permettre une certaine prévision de l'enracinement.

La troisième partie aura un caractère synthétique. A l'aide des résultats de la deuxième partie, nous examinerons si l'on peut déduire rapidement, de façon au moins approximative, le type d'enracinement d'un sol (et non plus d'un horizon) donné de la connaissance de certains facteurs synthétiques : la roche-mère, le type de pédogénèse.

1ère Partie

MATERIEL D'ETUDE

ET

METHODES UTILISEES

CHAPITRE I

MATÉRIEL D'ÉTUDE

1) Délimitation géographique :

Afin de nous placer dans des conditions variées pour les propriétés du sol et l'enracinement, nous avons examiné une gamme assez étendue de roches-mères et de types de sol.

Il était intéressant d'éviter au maximum toute variation de l'enracinement due à des facteurs autres que ceux du sol, en particulier le climat. C'est pourquoi toutes les stations choisies se trouvent en Lorraine et à altitude relativement basse (toujours inférieure à 500 m).

2) Choix des essences - Leur mode d'enracinement :

Nous avons choisi l'Epicéa commun (*Picea excelsa* Link) et le Pin Sylvestre (*Pinus sylvestris* L.), essences de reboisement bien représentées en Lorraine. Bien que possédant, comme la plupart des Résineux, un enracinement plus superficiel que la majorité des espèces feuillues (EHWALD et al. 1961, KERN et al. 1961, KREUTZER, 1961, MAC QUEEN 1966), ces 2 essences ont des tendances naturelles d'enracinement différentes : souvent les racines d'Epicéa demeurent presque uniquement à proximité de la surface du sol, alors que le Pin a, en général, un pivot, ainsi que des racines s'enfonçant, elles, en profondeur.

Ces différences sont d'ailleurs peut-être dues à la façon dont le système racinaire des 2 espèces réagit aux propriétés du sol ; ainsi les racines du Pin s'accommoderaient mieux des horizons tassés (MELZER 1964) et des pseudogleys (KREUTZER 1961) que celles de l'Epicéa. Cependant l'Epicéa aurait un enracinement relativement profond dans les sols meubles et aérés (DUCHAUFFOUR 1953, KOSTLER 1962, LEIBUNGUT 1963) ; pour KERN et al (1961), son système racinaire ne resterait superficiel que si l'horizon humifère contient une quantité suffisante d'éléments nutritifs pour satisfaire ses besoins. L'enracinement du Pin sylvestre lui-même a des allures très différentes suivant les sols (HOCHTANNER et SEITSCHER, 1964) ; pour KOSTLER (1962), il dépendrait moins des propriétés physiques du sol que celui de l'Epicéa.

3) Limites d'âge :

Les peuplements choisis sont équiennes et ont des âges compris dans un éventail assez étroit : les 9/10 ont entre 27 et 42 ans. On peut supposer que le système racinaire ne varie pas trop entre les limites d'âge choisies ; de toute façon, pour vérifier cette hypothèse, on introduira le facteur " âge " dans l'étude statistique.

Les peuplements n'ont pas été choisis plus âgés, afin d'avoir une densité d'arbres encore homogène et peu de végétation arbustive.

Ils n'ont pas été choisis plus jeunes pour que l'enracinement définitif, différent de celui des premières années, ait bien eu le temps de se développer.

4) Type de recherche :

Il ne s'agit pas d'une expérimentation, impossible dans le cas présent, mais " d'observations ". Les variables que l'on étudie (l'enracinement et les propriétés du sol) ne sont pas contrôlées, mais aléatoires, elles varient indépendamment de l'observateur.

C'est pourquoi les corrélations que l'on mettra en évidence ne pourront être interprétées automatiquement dans un sens de causalité.

CHAPITRE II

METHODES DE MESURE DE L'ENRACINEMENT

ET DES PROPRIETES DU SOL

I - MESURE DE L'ENRACINEMENT -

1) Choix de la grandeur à mesurer :

Il y a souvent une certaine hétérogénéité dans les propriétés d'un horizon . Il est donc nécessaire de ne comparer la densité d'enracinement qu'aux propriétés du sol provenant exactement du même emplacement que les racines . C'est pourquoi la méthode qui consiste à dégager l'ensemble d'un système racinaire à l'aide d'une lance d'arrosage (HOLSTENER - JORGENSEN 1959) ne saurait convenir au but fixé.

Une méthode susceptible de nous convenir consiste à prélever à l'endroit voulu un certain volume de sol avec les racines qu'il contient ; au laboratoire l'on sépare sol et racines ; la densité d'enracinement est exprimée par la longueur ou le poids de racines par unité de volume de sol ; cette méthode a été utilisée par plusieurs auteurs : EHWALD et al. (1961), KALELA (1950), KERN et al. (1951), MAC QUEEN (1966), MAERTENS (1964), SLAVIKOVA (1958), ZUTTL (1964) ; ces auteurs prélevaient le sol, par exemple à l'aide de cylindres d'acier ou de pelles spéciales et séparaient sol et racines par différentes méthodes : arrosage, tamisage, emploi de solutions dispersantes, etc...

La longueur et le poids de racines dans un certain volume ne sont pas des grandeurs idéales pour représenter la densité d'enracinement : la longueur est souvent difficile à mesurer avec une certaine précision car dans bien des cas les racines sont très courbées, torsadées, etc... ; et si l'on choisit le poids, il est nécessaire de distinguer un grand nombre de catégories de diamètres pour ne pas défavoriser les racines fines par rapport aux racines plus grosses . Mais surtout la séparation des racines et du sol est très longue et délicate ; l'on évite difficilement une fragmentation excessive des racines ; lors d'essais que nous avons effectués, l'isolement de l'ensemble des racines d'un prélèvement s'est même avéré pratiquement impossible pour certains sols très argileux.

La méthode que nous avons finalement choisie consiste à déterminer par comptage le nombre de racines émergeant d'un profil, à différentes profondeurs ; l'on ramène ce nombre à un rectangle de dimensions standard considéré comme l'unité de surface ; l'on obtiendra ainsi la " densité d'enracinement " à différents niveaux . Cette méthode a d'ailleurs été employée par certains auteurs, parfois concurremment avec d'autres

méthodes, (mesure de la longueur ou du poids) : EHWALD et al. (1961), KERN et al. (1961), KORSTIAN et COILE (1933).

Cette méthode est simple et rapide; de plus elle permet d'obtenir sans qu'elle soit perturbée la terre même dans laquelle se trouvaient les racines comptées. Mais il est certain qu'elle n'est pas non plus parfaite; ainsi elle ne permet guère de considérer les racines plongeantes des arbres; néanmoins, comme elle est identique pour toutes les stations étudiées, elle permet d'obtenir des indices d'enracinement que l'on est en droit de comparer; et KERN et al. (1961), dans des peuplements mélangés d'Epicéa, Sapin et Hêtre, ont établi que le comptage des racines fines émergeant d'un profil et la mesure de la longueur des racines extraites d'un certain volume de sol donnaient une estimation égale de l'enracinement.

2) Prélèvement des racines sur le terrain :

Les fosses pédologiques ont été creusées bien à l'intérieur des peuplements, à un emplacement assez représentatif de la Station situé près de la base d'un arbre dominant. C'est là en effet qu'on a le plus de chances de trouver le maximum de racines dans un sol. De toute façon, l'enracinement d'un sol ne varie pas toujours sensiblement en fonction de la position par rapport aux arbres (MAC QUEEN 1966).

Les fosses ont été creusées en demi-cercle, centré sur l'arbre. Le profil à étudier est à 1,10 m de sa base, distance ramenée à 1 m environ par dégagement des racines. Il n'a pas été possible de creuser les fosses tout autour de l'arbre; cela peut donner une idée fausse des potentialités d'enracinement du sol en cas d'enracinement très dissymétrique.

En l'absence d'obstacle infranchissable, les fosses ont été creusées à 1,20 m de profondeur. En terrain en pente, la fosse se trouve sur le côté de l'arbre, dans le sens de la plus forte pente.

Les emplacements du profil où l'on prélève les racines ne se situent pas automatiquement à des profondeurs identiques pour toutes les stations, mais aux profondeurs où l'on détecte un changement d'horizons, ou une autre variation apparente de propriétés du sol (par exemple un changement de résistance à la pénétration), ou une différence assez nette de la densité d'enracinement par rapport au niveau situé juste au-dessus.

La densité d'enracinement est obtenue par mesure du nombre de racines qui émergent à l'intérieur de rectangles que l'on a délimité à l'aide d'une ficelle maintenue par des fils métalliques enfoncés dans le profil. Ces rectangles ont une hauteur de 10 cm en général et une longueur comprise entre 20 cm et 1 m suivant la densité de l'enracinement (1 m dans le cas d'un enracinement faible ou très irrégulier).

Le profil est soigneusement découpé à l'intérieur de ces rectangles sur une épaisseur d'environ 10 cm. On a donc la possibilité de dégager les racines même verticales dans une tranche de sol de 10 cm d'épaisseur.

3) Identification des racines de Résineux :

Dans certaines des stations étudiées se trouvent des arbres appartenant à 2 espèces résineuses différentes; mais l'emplacement de la fosse pédologique a été choisi de façon telle que les seules racines de Résineux pouvant être prélevées étaient celles de l'essence étudiée (Epicéa ou Pin sylvestre).

Il s'agit donc de pouvoir distinguer, dans les racines prélevées, celles des Résineux de celles des Angiospermes dicotylédones (ces 2 groupes se distinguent des autres végétaux par la présence du bois). Dans ce but, on se fonde sur un ensemble de caractères anatomiques se retrouvant uniquement chez les Gymnospermes.

Les 2 caractères principaux permettant de reconnaître une racine de Résineux sont les suivants :

1- Le bois des résineux est homoxylé; il comprend essentiellement des trachéïdes et ne possède pas de fibres de soutien. Ces trachéïdes sont facilement reconnaissables; leur paroi est lignifiée, ils sont très rigides; mais ces parois sont peu épaisses, et la lumière des trachéïdes est grande. Au contraire le bois de la grande majorité des dicotylédones est hétéroxylé; ses éléments conducteurs principaux ne sont pas des trachéïdes mais de vrais vaisseaux ligneux; avec ces vaisseaux se trouvent principalement des fibres ligneuses, facilement reconnaissables, à parois épaisses et lumière très petite, constituant en général plus de 50% du bois des angiospermes. Dans les deux catégories de bois se trouvent des cellules de parenchyme.

2- Dans le bois des résineux, il y a des canaux résiniférés typiques, nettement visibles chez l'Epicéa et le Pin sylvestre.

De plus, certains autres caractères du bois des Résineux peuvent aider à l'identification :

- les rayons ligneux (formés de cellules parenchymatiques) y sont minces, ils ne comprennent en général qu'une seule épaisseur de cellules.

- les racines de Résineux présentent souvent une odeur de résine.

- la distinction entre bois de printemps et d'été est nettement marquée, ce qui n'est pas le cas chez un certain nombre de dicotylédones.

Il était nécessaire, en raison du grand nombre de fragments de racines prélevées sur le terrain, d'employer au laboratoire une méthode d'identification relativement rapide, tout en permettant la reconnaissance de la grande majorité des racines à diamètre pas trop faible.

La méthode suivante a été utilisée :

- sur la racine séchée à l'air au laboratoire, l'on effectue aux 2 extrémités une section transversale nette. L'on trempe chaque section un court instant dans de l'eau, afin de permettre aux tissus de reprendre par gonflement un aspect normal (en particulier turgescence des cellules). L'ensemble des fragments provenant d'un même prélèvement est mis à sécher sur un papier buvard pendant un temps compris entre une et quelques heures. Puis l'on examine les différentes sections à la loupe binoculaire, en général à un grossissement de 70; le fragment de racine est classé dans une des catégories : Résineux ou non Résineux; certains fragments ne peuvent être classés : il s'agit surtout de ceux à diamètre très faible.

4) Classes de diamètre et densité d'enracinement :

Il était logique de vouloir grouper les racines par classes de diamètre. Notre intention primitive était d'utiliser 2 catégories : < 1 mm et > 1 mm; en effet, beaucoup d'auteurs ont qualifié de fines les racines à diamètre < 1 mm. Cependant, il s'est très rapidement avéré qu'une forte proportion des racines à diamètre $< 3/4$ mm n'était pas identifiable par la méthode employée; en définitive, on classe les racines, immédiatement après les avoir identifiées, en 3 catégories : diamètre > 1 mm, compris entre $3/4$ et 1 mm, et $< 3/4$ mm, cette dernière catégorie n'étant conservée qu'à toutes fins utiles. Le diamètre est déterminé à l'aide d'un papier millimétré.

On a comparé (ultérieurement) graphiquement et statistiquement 2 catégories de racines : à diamètre $> 3/4$ mm et > 1 mm; il s'est avéré que la liaison entre ces 2 catégories était extrêmement forte (coefficient de corrélation de 0,97); par conséquent l'on ne considérera plus, dans la suite de ce travail, qu'une seule catégorie de racines : l'ensemble des racines à diamètre $> 3/4$ mm.

On a choisi comme rectangle unitaire un rectangle de 10 dm^2 (en général 1 m de long et 10 cm de haut); les chiffres de racines obtenus sont ramenés à ce rectangle; on considérera donc dorénavant comme densité d'enracinement le nombre de racines de Résineux à diamètre $> 3/4$ mm

qui émergent (ou émergeraient) du rectangle unitaire de 10 dm². Il en sera d'ailleurs pour les racines des plantes non résineuses comme pour les racines de Résineux; leur densité d'enracinement sera utilisée comme variable dans l'étude statistique; en effet, on peut penser qu'elle influe sur la densité des racines de Résineux.

Avec la densité d'enracinement ainsi définie, l'on dispose d'un indice permettant de comparer l'enracinement dans les différents sols.

II - MESURE DES PROPRIETES DU SOL -

1) Propriétés déterminées sur le terrain :

Ces propriétés destinées à être comparées à l'enracinement, sont pour la plupart relevées spécialement à l'intérieur des rectangles qui servent au prélèvement des racines.

a) Profondeur d'enracinement Fr 5 :

Il est possible que la densité d'enracinement d'un horizon dépende de la profondeur totale de l'enracinement dans le profil. C'est ce qu'a constaté MAERTENS (1964) : plus de racines en surface dans un sol superficiel que dans un sol plus profond.

La profondeur absolue de l'enracinement étant très difficile à déterminer, nous avons choisi pour la représenter une grandeur qu'on peut lui supposer liée : la profondeur maxima où l'on trouve une densité de racines d'au moins 5 (5 racines $\geq$ 3/4 mm, dans le rectangle de 10 dm²), désignée par Pr 5.

b) Cailloux :

La teneur en cailloux est exprimée en pourcentage de surface occupée par les cailloux sur la section du profil délimitée par le rectangle. C'est une estimation assez approximative.

On ne sait, à priori, de façon certaine si leur rôle est défavorable ou non; trop nombreux, ils constituent un obstacle pour les racines; mais ils peuvent souvent retenir plus ou moins d'eau (GRAS et MONNIER 1963), et même augmenter la perméabilité en sol argileux.

c) Hydromorphie :

Nous avons chiffré l'hydromorphie à l'aide des traces qu'elle laisse dans le sol. L'indice Hy1 représente l'intensité de l'hydromorphie. On donne à Hy1 d'un horizon A2g les valeurs 1, 2 ou 3, suivant le nombre et la netteté des traces d'hydromorphie. Pour conserver la même échelle, dans tout le profil, nous avons noté Hy1 des horizons Bg des pseudogleys par les chiffres 4, 5 ou 6, car on peut supposer l'hydromorphie des Bg plus défavorable que celle des A2g; cela est peut-être critiquable, car il s'agit de 2 types d'hydromorphie différents (mais se traduisant l'un et l'autre par un défaut d'aération). Le bariolage de l'horizon Bg des sols simplement marmorisés a été noté par les chiffres 1, 2 ou 3.

On a introduit accessoirement un 2ème indice d'hydromorphie : Hy2; c'est la " profondeur d'hydromorphie "; il exprime, en centimètres, la distance verticale existant entre les signes d'hydromorphie les plus proches de la surface et le prélèvement hydromorphe considéré. On a utilisé Hy2 pour pallier aux insuffisances éventuelles de Hy1 : en effet, l'intensité des signes d'hydromorphie dépend de la quantité de fer du profil.

d) Résistance à la pénétration (ou " dureté ") :

La densité d'enracinement lui est liée (MAERTENS 1964, TAYLOR et al. 1963-1964). Mais sa valeur varie dans le temps, car elle dépend de l'humidité du sol. Pour cette raison il a été impossible de comparer la résistance à la pénétration des différents sols étudiés.

Par contre nous avons comparé, à un même moment, la résistance à la pénétration des différents horizons de chacun des sols. Nous avons opéré non pas quantitativement (nous ne disposions pas d'un " pénétromètre "), mais qualitativement, en notant surtout les variations brusques de cette résistance d'un horizon au suivant. Une augmentation brutale de résistance à la pénétration correspond en effet souvent à une forte baisse de la densité d'enracinement.

2) Propriétés déterminées au laboratoire (terre fine)

Les analyses sont effectuées sur des échantillons de sol prélevés, comme les racines, à l'intérieur des rectangles.

a) Propriétés physiques :

1- Granulométrie :

Déterminée par densimétrie (méthode MERIAUX), sans destruction du calcaire. Pour dénommer la texture, on utilise le diagramme des textures (DUCHAUFOR 1965).

2- Densité apparente (d') et porosité totale :

On utilise la méthode BURGER (1922) : Sols prélevés dans des cylindres métalliques de 250 ml. En sol légèrement caillouteux, on utilise parfois des cylindres de volume plus réduit. Il n'a pas été possible d'effectuer cette mesure pour les horizons trop caillouteux.

3- Stabilité structurale :

Il s'agit de la méthode, mise au point par HENIN et al., qui consiste à déterminer 3 indices : I_s , K et Σ . Afin d'éviter des confusions, on désignera l'indice K par K_p .

- Test I_s - On attaque la structure d'un sol par de l'eau sur 3 échantillons, dont 2 ont subi un prétraitement (alcool éthylique et benzène). I_s , qui est d'autant plus élevé que la structure est plus instable, dépend de la proportion d'éléments fins non engagés dans des agrégats stables, après un tamisage sous l'eau, et est donné par la formule :

$$I_s = \frac{(\text{argile} + \text{limons fins}) \text{ maximum (\%)}}{\text{Moyenne arith. des agrégats } > 200 \mu \text{ (\%) - 0,9}} \\ \text{Sables grossiers (\%)}$$

- Test K_p - Il complète le test I_s . Il se présente comme une mesure de perméabilité, d'ailleurs sa valeur est donnée par la formule de DARCY :

$$K_p = \frac{C \times V}{S \times H}$$

avec :
 C = hauteur de la colonne de terre (cm)
 V = volume d'eau recueilli pendant la 1ère heure de percolation (cm³)
 S = section intérieure du tube (cm²)
 H = distance entre la surface libre de l'eau et la partie inférieure du tube (cm).

K_p est d'autant plus élevé que la structure est plus stable.

- Indice Σ - Il résulte de la combinaison, par une méthode graphique, de I_s et K_p . Il permet de représenter la stabilité structurale d'un sol par un nombre unique.

4- Eau utile :

Il s'agit du maximum d'eau absorbable par les plantes qu'un sol est susceptible de retenir, exprimé en pourcent de poids. Elle est à peu près égale à l'eau retenue à la capacité au champ, diminuée de l'eau qui correspond au point de flétrissement.

On mesure le point de flétrissement à l'aide d'une presse à membrane, où l'on applique une pression de 16 atmosphères (pF 4,2).

On a cherché à évaluer au laboratoire la capacité au champ. La pression à appliquer dans ce but varie suivant les sols (surtout d'après leur texture). On détermine cette pression par une méthode mise au point par GRAL (1962) : la pression à appliquer est fonction du pourcentage d'eau retenu à pF 3. Cela nous conduit à appliquer des pF variant de 1,8 à 3,0 dans un extracteur à basse pression.

5- Porosités capillaire (Fc) et non capillaire (FNc)

On considère Fc égal au produit de la teneur en eau à la capacité au champ par la densité apparente. On obtient FNc par différence entre la porosité totale et la porosité capillaire.

6- Eau utile cumulée :

Il s'agit du maximum d'eau utile pouvant être stockée dans le sol au-dessus du prélèvement considéré. Nous avons introduit cette variable car on peut supposer qu'un arbre s'enracinera plus ou moins profondément suivant la quantité d'eau mise à sa disposition dans les horizons les moins profonds.

Pour chaque horizon, homogène, la quantité maxima d'eau utile, exprimée en mm de hauteur d'eau, est égale à :

$$\frac{h \times d' \times (c - f)}{100}$$

h étant l'épaisseur de l'horizon (mm)

d' sa densité apparente et

c - f sa réserve maxima en eau utile (% de poids).

E U C sera donc égal à la somme des valeurs $\frac{h \times d' (c - f)}{100}$ des horizons situés au-dessus du prélèvement considéré.

b) Propriétés chimiques :

Elles sont déterminées par les méthodes courantes décrites dans le " Précis de Pédologie " (DUCHAUFOR 1965).

- pH mesure sur un mélange sol-eau par la méthode électrométrique
- Carbone et matière organique : méthode ANNE.
- Azote total : méthode ANSTETT
- Capacité totale d'échange : percolation à l'acétate d'ammonium et distillation au micro-kjeldahl
- Calcium et potassium échangeables : percolation à l'acétate d'ammonium et dosage au photomètre à flamme
- Phosphore assimilable : méthode DUCHAUFOR - BONNEAU
- Calcium total : calcimètre BERNARD, et calcium actif : méthode DROUINEAU
- Fer libre : méthode DEB
- Aluminium et hydrogène échangeables : titrimétrie.

CHAPITRE III

LES STATIONS

Nous avons groupé, au départ, les stations par région géographique, sans tenir compte de la roche-mère ni du sol. Nous désignons ainsi chaque station par la, ou les 2 premières lettres de son groupe, suivies d'un numéro; ainsi il y a les stations de :

- l'arboretum de la Sivrite et la Forêt de Haye, à 5 km au Sud-Ouest de Nancy : S1, S2...
- l'arboretum d'AMANCE, à 12 km au Nord-Est de NANCY : A1, A2...
- la région de SAINT-AVOLD : Sa1, Sa2, ...
- la région de VERDUN : V1, V2, ...
- la région de SAINT-DIE : D1, D2, ...
- la région de COMMERCEY : C1, C2, ...
- la région de MIRECOURT : M1, M2, ...

Les roches-mères et types de sols que l'on y trouve sont les suivants :

1) Grès vosgien (en place ou éboulé)

a) Stations plates, en plaine :

- Sol brun lessivé à pseudogley, texture sableuse, Sa1 (P) (1)
- Sol lessivé à pseudogley, texture sableuse ou équilibrée à sableuse : Sa2 (P), Sa3 (E) (1), Sa4 (P), Sa6 (E)
- Sol brun oligotrophe, texture sableuse : Sa5 (E).

b) Stations en pente et à une certaine altitude :

- Sol brun oligotrophe, texture sableuse : D3 (P), D4 (P)
- Sol podzolique : Texture sableuse : D5 (P)
Texture équilibrée : D6 (P) (mélange de grès vosgien et Permien).

2) Muschelkalk marneux :

- Sol brun lessivé marmorisé, texture limoneuse puis argileuse : M1 (E), M3 (P), M8 (P)
- Pseudogley, texture équilibrée à limoneuse, puis argileuse : M7 (E).

3) Keuper :

- sol calcaire vertisolique, texture argileuse puis équilibrée :
M5 (E), M10 (P)

4) Grès infraliasique et keuper :

- Sol lessivé, texture équilibrée puis argileuse : M2 (E)

5) Sinémurien marneux :

- Sol brun lessivé marmorisé, texture argileuse : M9 (E)

6) Aalénien et colluvium de pente :

- Sol brun lessivé, texture équilibrée : S4 (E)

- Sol brun mésotrophe, texture équilibrée : S6 (E)

7) Roche-mère calcaire du jurassique supérieur :

- Sol brun calcaire, texture argileuse : V1 (P), V2 (P), V4 (E),
V5 (P), V6 (E), V7 (P), V8 (E), V9 (P), C2 (E), C3 (E).

- Sol brun calcimorphe (plus exactement intermédiaire entre
le sol brun calcaire et le sol brun calcimorphe), texture argileuse : V3 (E),
C1 (E).

8) Terra Fusca (argiles de décalcification du Bajocien et limons
éoliens) :

- Sol brun lessivé, texture équilibrée à limoneuse, puis argi-
leuse : S1 (E), S2 (E), S3 (E).

- Sol lessivé, texture équilibrée à limoneuse, puis argileuse :
S8 (P), S9 (P).

- Sol brun mésotrophe sur colluvium de Terra Fusca, texture
équilibrée à limoneuse : S5 (E).

(1) : (E) signifie peuplement d'Epicéa
(P) peuplement de Pin.

9) Alluvions quaternaires :

- D2 (P) - Sol brun lessivé à pseudogley, texture équilibrée D1 (P),
 - Sol lessivé à pseudogley, texture équilibrée à limoneuse,
 puis argileuse : M4 (P), M6 (E)

10) Limons (recouvrant les marnes à AMALTHEUS du Charmou-
 thien) :

- se : A3 (P) - Sol brun lessivé à pseudogley, texture limoneuse puis argileu-
 - Pseudogley, texture limoneuse puis argileuse : A1 (E), A2
 (E), A4 (F).

La description des profils ainsi que les valeurs de l'enracine-
 ment et des propriétés du sol se trouvent en annexe.

2ème Partie

CORRELATIONS ENTRE L'ENRACINEMENT

ET LES PROPRIETES DU

SOL ET PREVISION DE L'ENRACINEMENT

Rappelons que, dans cette deuxième partie, nous considérons chaque horizon (ou plus exactement chacun des prélèvements) comme une entité indépendante représentée par sa densité d'enracinement R (1) et ses propriétés physiques et chimiques chiffrées. Afin de mettre en corrélation l'enracinement et les propriétés du sol, nous utiliserons deux méthodes :

- La méthode graphique, rapide, fournissant une représentation concrète des corrélations,
- La méthode statistique donnant de ces corrélations une valeur chiffrée, et permettant d'autre part une étude plus approfondie (coefficients de corrélation partielle, etc..)

(1) : Dorénavant, nous désignerons par R la densité d'enracinement mesurée de la façon indiquée (nombre de racines par 10 dm²)

CHAPITRE I

RELATIONS ENTRE LES PROPRIETES DU SOL ET L'ENRACINEMENT

1 - GRAPHIQUES ENRACINEMENT - PROPRIETES DU SOL -

Afin de mettre en lumière les liaisons entre l'enracinement et une propriété du sol, nous avons indiqué sur des graphiques les points représentatifs de tous les prélèvements, la propriété considérée étant représentée en abscisse et la densité d'enracinement R en ordonnée.

L'horizon A1 possède des caractères très spéciaux dûs à la matière organique; sur les graphiques, les points représentatifs des A1 sont en général nettement séparés des autres et semblent ne pas obéir aux mêmes règles; c'est pourquoi, sur les graphiques ci-après, nous n'avons pas représenté les horizons A1, d'autant plus que, pour l'Epicéa tout au moins, ils sont toujours très bien enracinés. Mais souvent se produisent des infiltrations organiques plus en profondeur; pour cette raison, nous avons représenté les horizons (autres que A1) situés au-dessus de 32 cm différemment des horizons situés dessous (o pour les premiers, x pour les seconds).

Soit l'un de ces graphiques : enracinement R de l'Epicéa fonction de la teneur en argile (fig. 1). Visiblement, l'on ne peut en déduire aucune liaison entre ces 2 variables. Cependant, cela n'exclut pas la possibilité d'une liaison réelle, mais masquée par la variation des autres facteurs.

Dans le cas de l'argile, pour l'Epicéa, la méthode graphique ne nous est donc d'aucune utilité. Il en est de même pour d'autres propriétés. Mais bien souvent l'examen des graphiques s'avère intéressant:

1) Variables fournissant une droite limite intéressante pour les 2 essences :

a) Densité apparente (d') (fig. 2 et 3) :

- Pin -

Le graphique montre que R et d' sont liés; l'on pourrait facilement tracer une droite moyenne (droite de régression); mais les points seraient souvent assez éloignés de cette droite, ce qui est normal car R n'est pas déterminé que par une variable, d' en l'occurrence. La droite

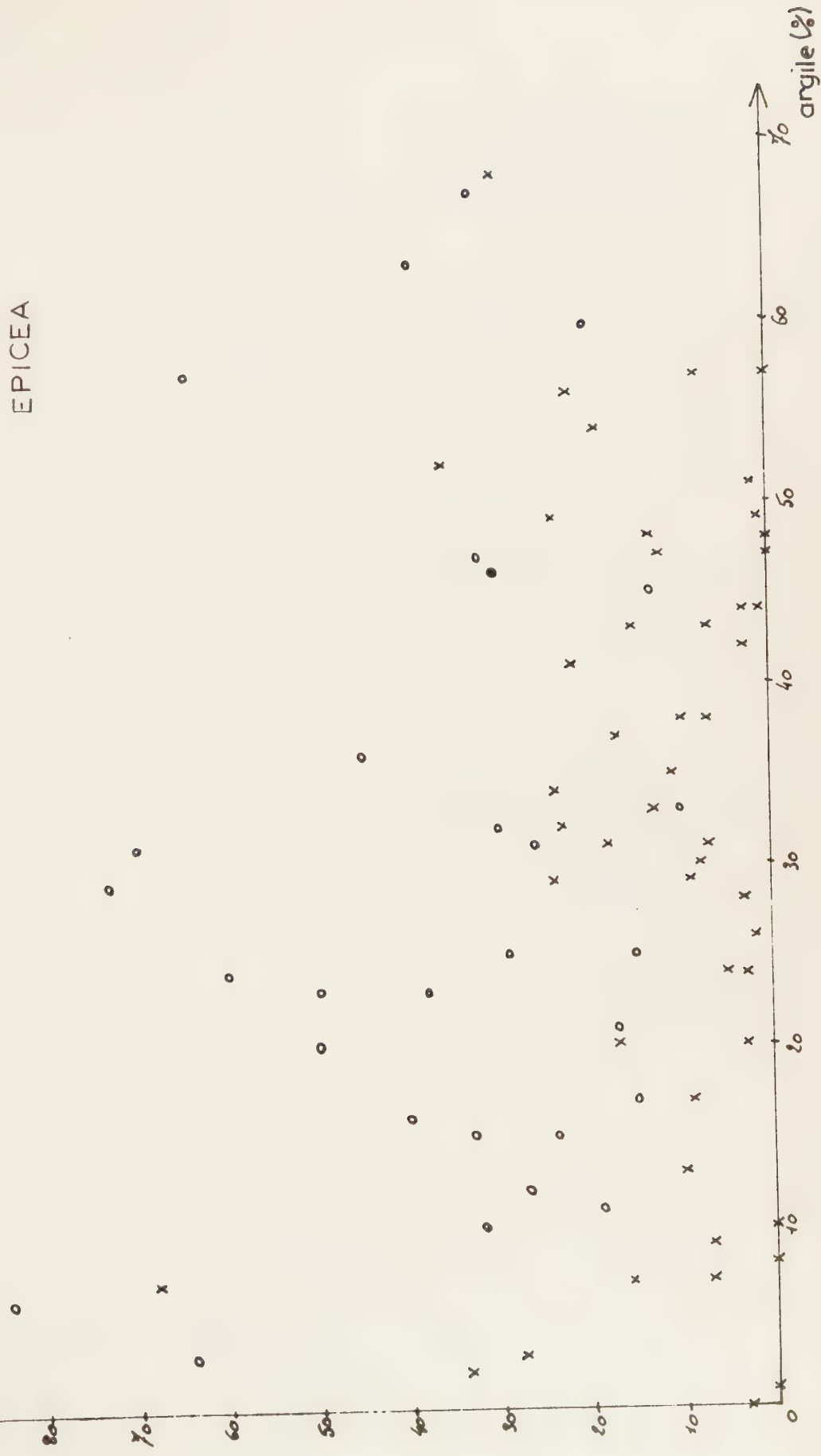
R

○ : jusqu'à -32 cm de profondeur
(sauf horizon n°1)

x : sous -32 cm

FIG. 1

ENRACINEMENT EN FONCTION
DE LA TENEUR EN ARGILE
EPICEA



o : jusqu'à - 32 cm de profondeur
(sauf horizon A1)
x : Saub - 32 cm

FIG. 2

ENRACINEMENT EN FONCTION
DE LA DENSITE APPARENTE
PIN

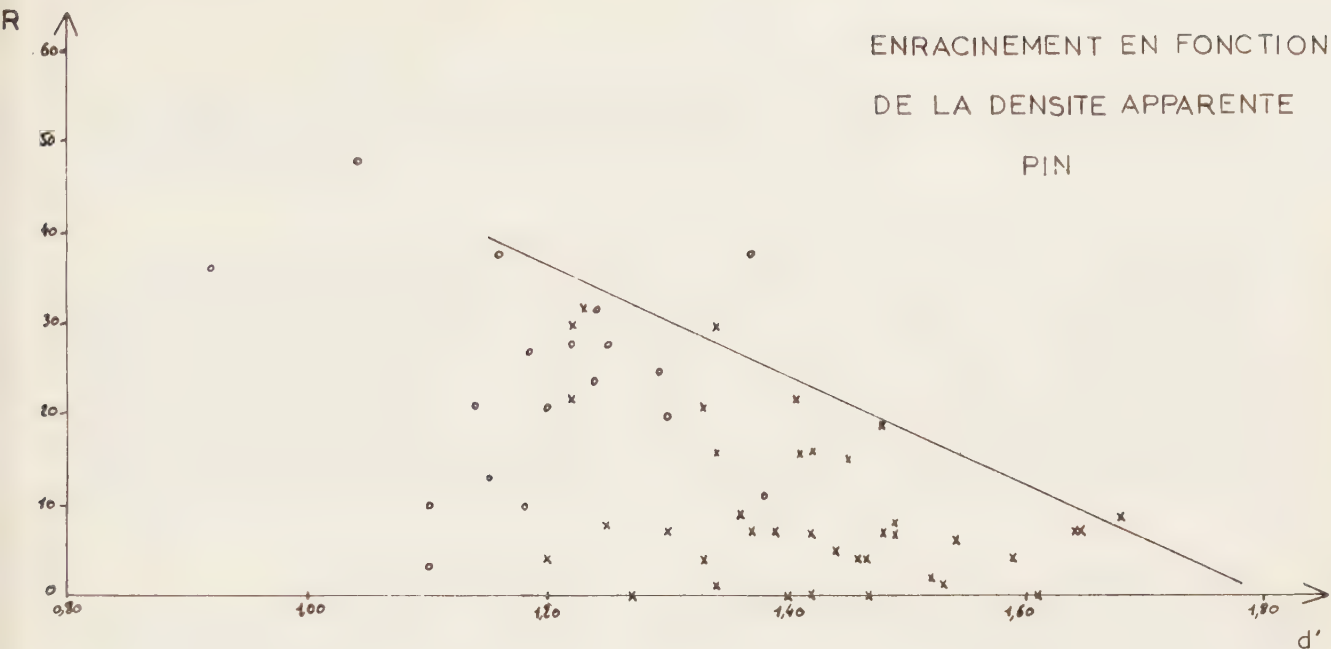
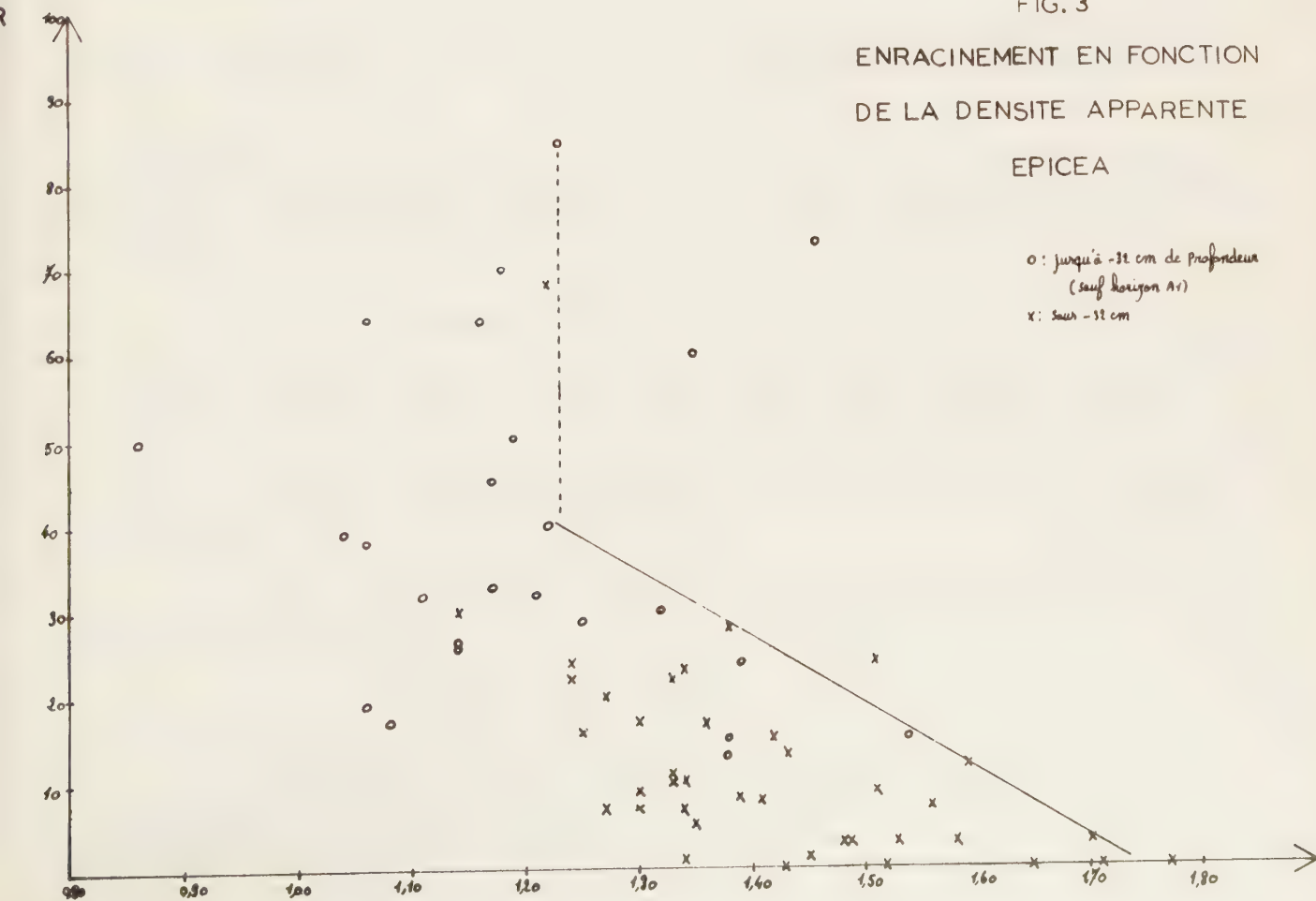


FIG. 3

ENRACINEMENT EN FONCTION
DE LA DENSITE APPARENTE
EPICEA



moyenne n'aurait donc pas grande valeur pour une prévision de R. De toute façon, le coefficient de corrélation entre R et d' sera calculé dans l'étude statistique.

Mais ce graphique peut nous être utile d'une autre façon : il est possible de tracer une droite séparant le graphique en 2 parties, de telle façon que les points se trouvent tous, ou presque, d'un seul côté. Cette droite fournit la valeur maxima atteinte par R pour chaque valeur de d' : ainsi lorsque $d' = 1,30$, R est au maximum égal à 30, etc...; cela permet de penser que d' peut jouer le rôle de facteur limitant de l'enracinement. Cette droite, que nous appellerons " droite limite ", offre donc un certain intérêt pour la prévision de R (elle permet de prévoir, non pas R exact, mais la valeur maxima possible de R).

Mais comment tracer cette droite limite ? Si on laisse tous les points en deçà de la droite, son intérêt pour une prévision ne sera pas très grand, car presque tous les points en seront nettement éloignés. Mais en laissant quelques points, au maximum 10%, au-delà de la droite, beaucoup plus de points en seront à proximité immédiate, ce qui sera très intéressant pour une prévision; il y aura pourtant un inconvénient : on se montrera ainsi parfois trop pessimiste.

La droite limite que l'on a tracée pour le Pin semble intéressante, car d'assez nombreux points en sont à proximité immédiate.

- Epicéa -

La droite limite est presque identique à celle du Pin, du moins pour $d' > 1,23$. Par contre, pour $d' \leq 1,23$, l'enracinement de l'Epicéa semble ne plus être limité du tout par d'.

b) Indice I_s (fig. 4 et 5) :

Pour le Pin, il y a 2 segments de droite limites. $I_s = 1,00$ constitue une valeur critique : lorsque I_s est $\geq 5,00$, R est $\leq I_s$.

Pour l'Epicéa, il y a également 2 segments de droite limites, ainsi qu'une valeur critique ($I_s = 0,75$).

Pour une même valeur de I_s , R maximum est plus élevé pour l'Epicéa que le Pin.

c) Indice K_p (fig. 6 et 7) :

Il s'avère, pour une meilleure représentation de la liaison, qu'il est plus intéressant de représenter $\log_{10} K_p$ (grandeur intervenant d'ailleurs dans la détermination de Σ) que K_p .

O: jusqu'à - 98 cm de profondeur
(sauf horizon A1)

X: sous - 98 cm

FIG. 4

ENRACINEMENT EN FONCTION
DE L'INDICE I_s
PIN

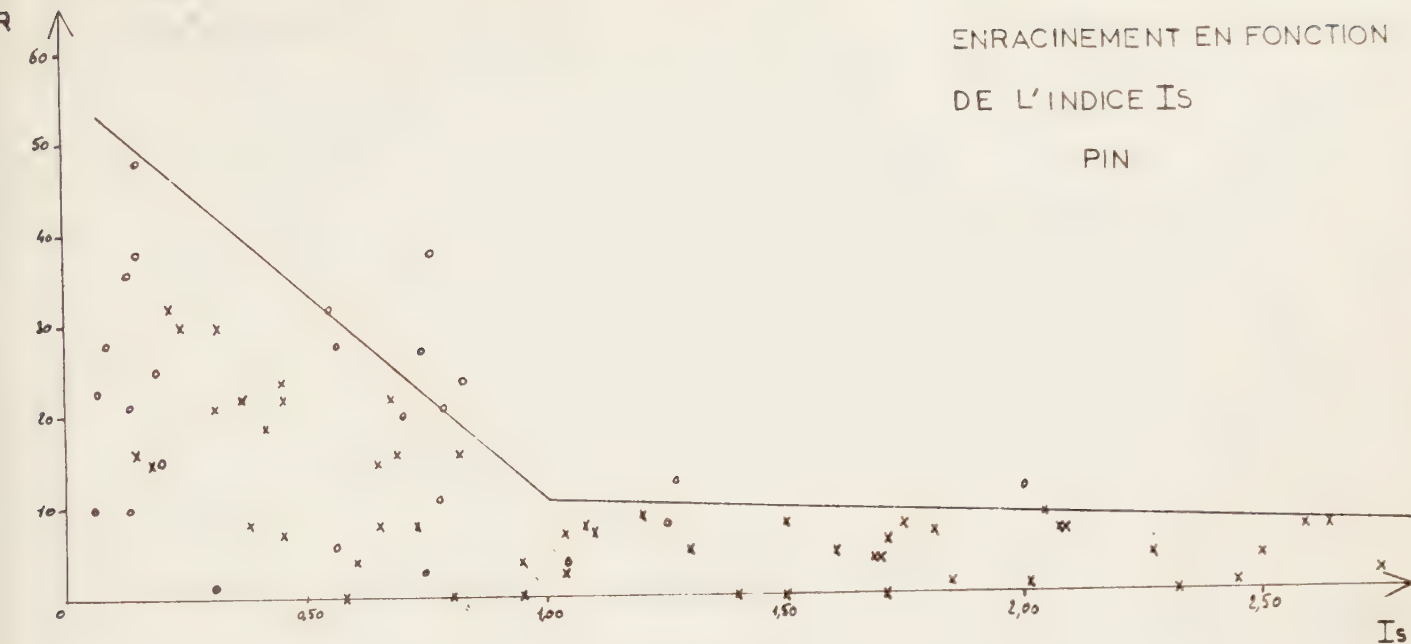
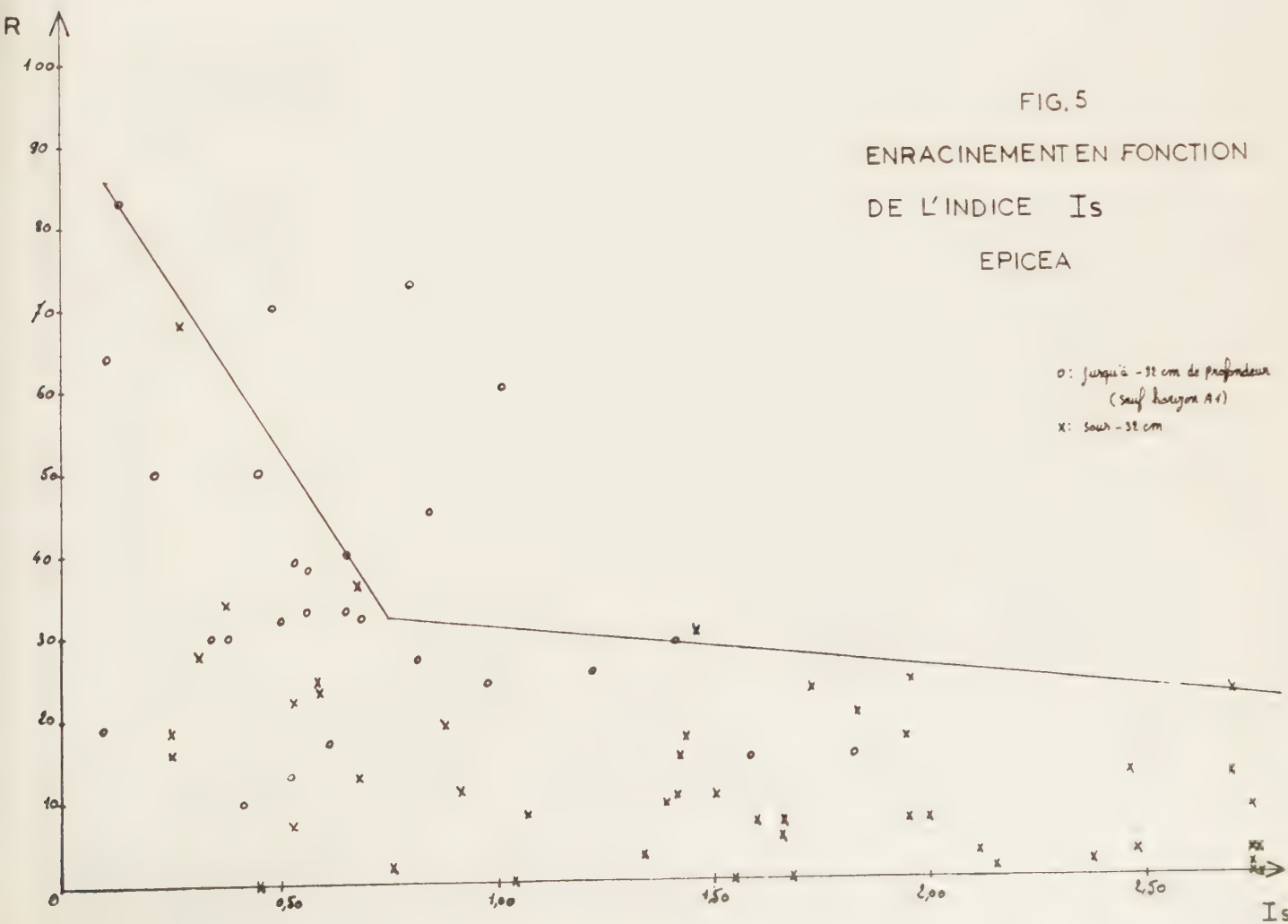


FIG. 5

ENRACINEMENT EN FONCTION
DE L'INDICE I_s
EPICEA



O: jusqu'à - 98 cm de profondeur
(sauf horizon A1)
X: sous - 98 cm

o : jusqu'à -32 cm de profondeur
(sauf horizon A1)

x : sous -32 cm

FIG. 6

ENRACINEMENT EN FONCTION
DE $\log_{10} Kp$
PIN

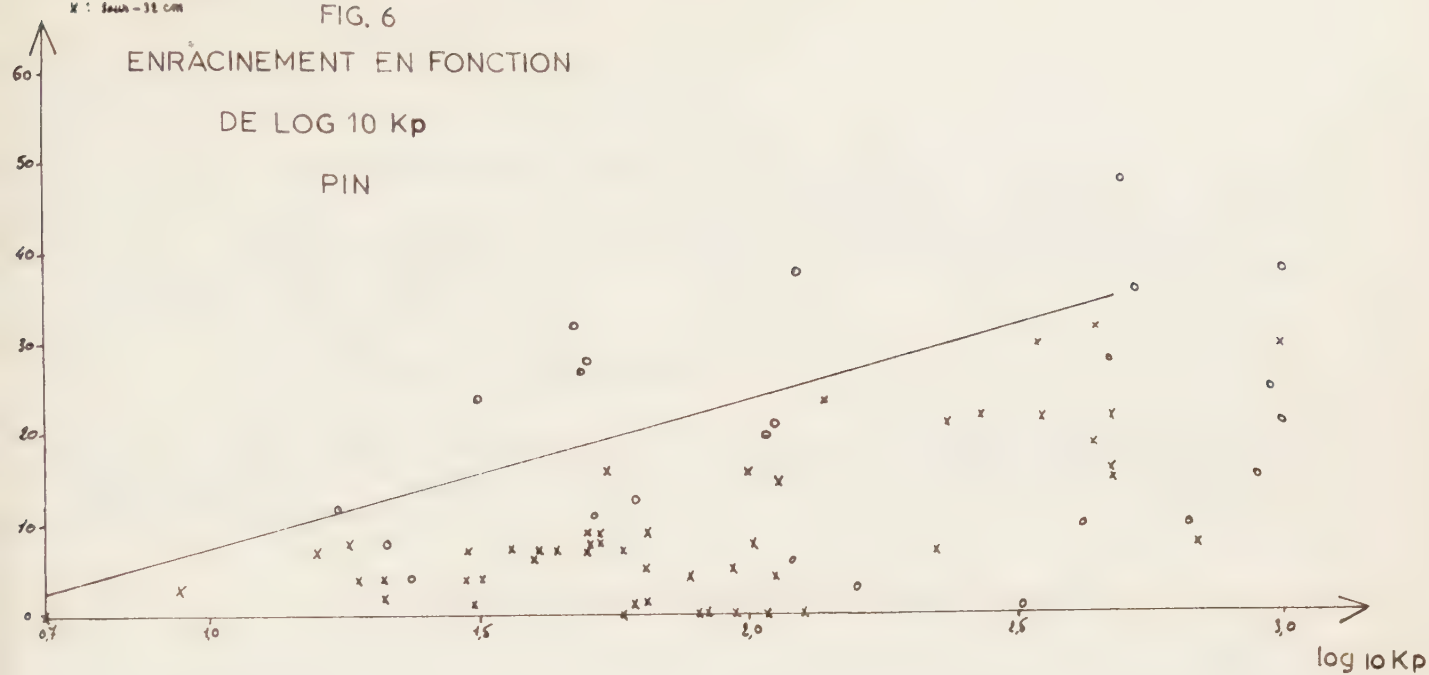
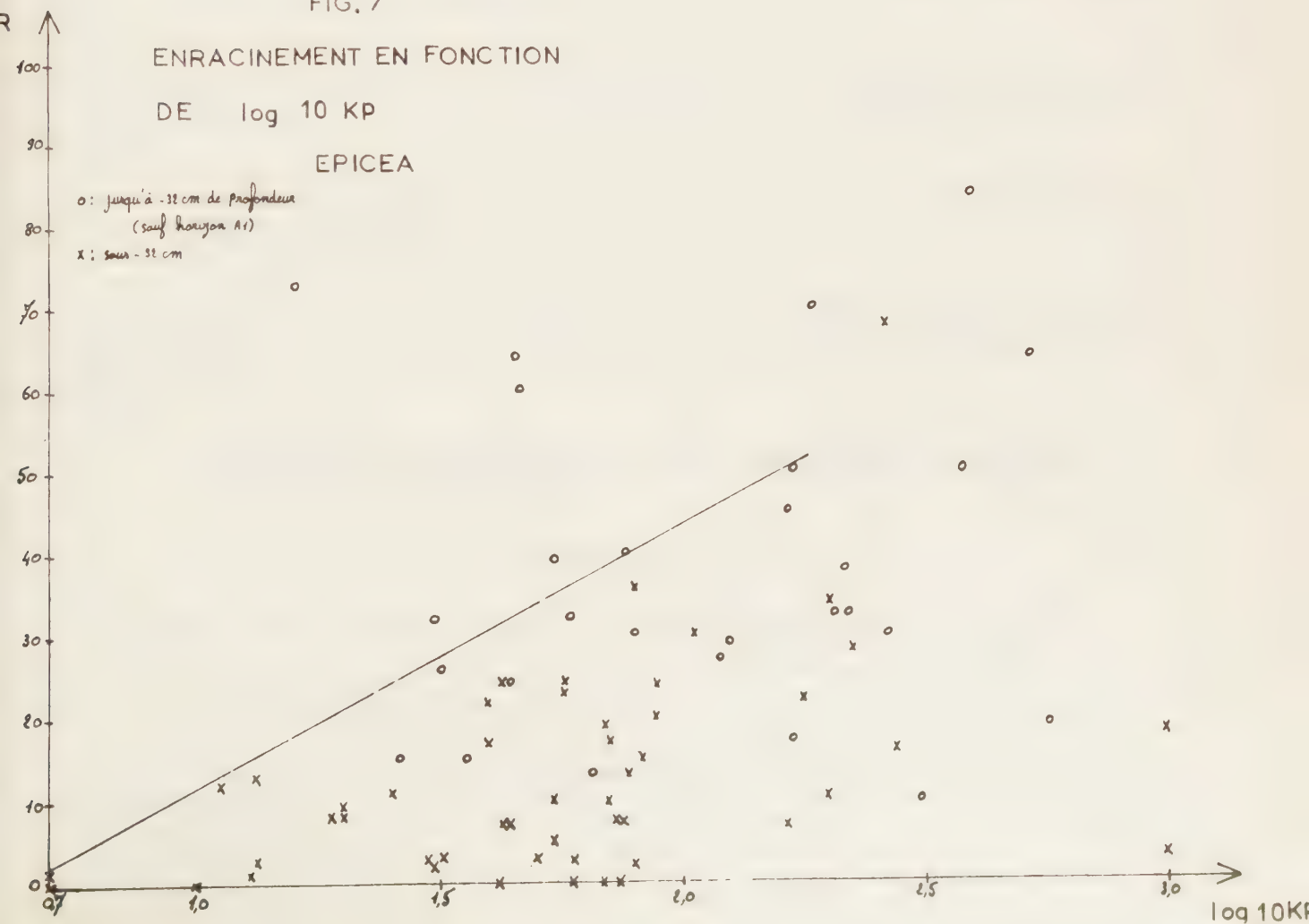


FIG. 7

ENRACINEMENT EN FONCTION
DE $\log_{10} Kp$
EPICEA

o : jusqu'à -32 cm de profondeur
(sauf horizon A1)

x : sous -32 cm



On peut tracer une droite limite pour chaque essence.

Même remarque que pour Is quant à la comparaison de droites limites des deux essences.

d) Indice Σ (fig. 8 et 9)

Σ étant la synthèse de Is et Kp, on aboutit aux mêmes résultats : droite limite pour chaque essence, R maximum plus élevé pour l'Epicéa que pour le Pin pour chaque valeur de Σ .

e) Porosité non capillaire (PNc) (fig. 10 et 11)

On peut tracer une droite limite pour les deux essences. L'enracinement limite est d'autant plus élevé que PNv est grand, ce qui traduit l'influence favorable d'une bonne aération.

f) Le maximum de réserve en eau utile au-dessus de chaque prélèvement (EUC) (fig. 12 et 13)

Les deux essences donnent lieu au tracé d'une droite limite. Cependant sa valeur réelle est assez douteuse car, bien que lié à la densité apparente et à c - f, EUC dépend surtout de la profondeur.

2) Variables ne fournissant une droite limite intéressante que pour le Pin (fig. 14 à 19) :

On s'aperçoit que l'enracinement limite est d'autant plus fort que la teneur en sables est plus élevée, que celle en limons, argile et phosphate est plus faible, et que le pH et la porosité capillaire sont plus faibles, tout cela pour le Pin.

3) Variables ne fournissant de droite limite intéressante pour aucune des deux essences :

Ce sont les autres variables :

c - f, Hy1, Hy2, matière organique, calcium, potassium, aluminium.

4) La profondeur (fig. 20 et 21) :

La droite limite que l'on peut tracer pour chaque essence est la résultante :

O : jusqu'à -32 cm de profondeur
(sauf horizon #1)

X : sous -32 cm

FIG.8

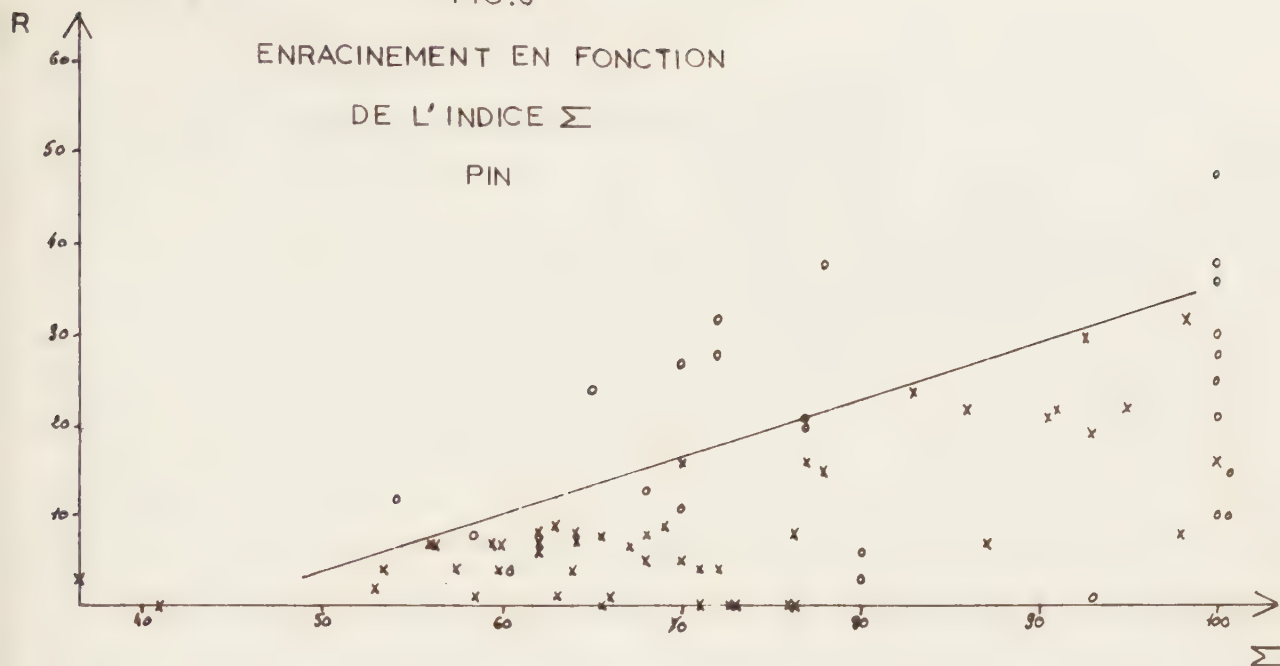
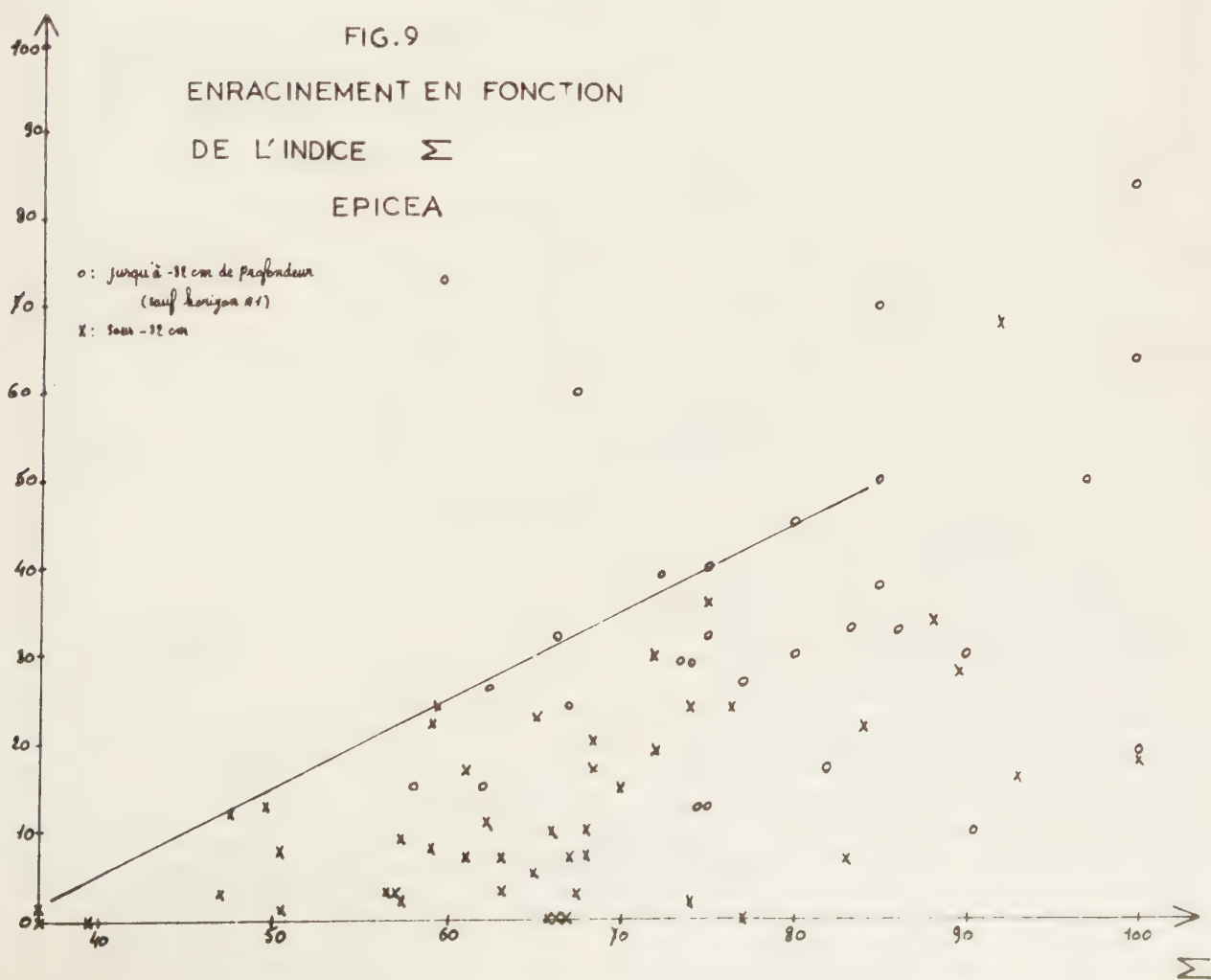


FIG.9

ENRACINEMENT EN FONCTION
DE L'INDICE Σ
EPICEA

O : jusqu'à -32 cm de profondeur
(sauf horizon #1)

X : sous -32 cm



O : jusqu'à -32 cm de profondeur
(sauf horizon A1)

X : sous -32 cm

FIG. 10

ENRACINEMENT EN FONCTION DE LA POROSITE NON CAPILLAIRE

PIN

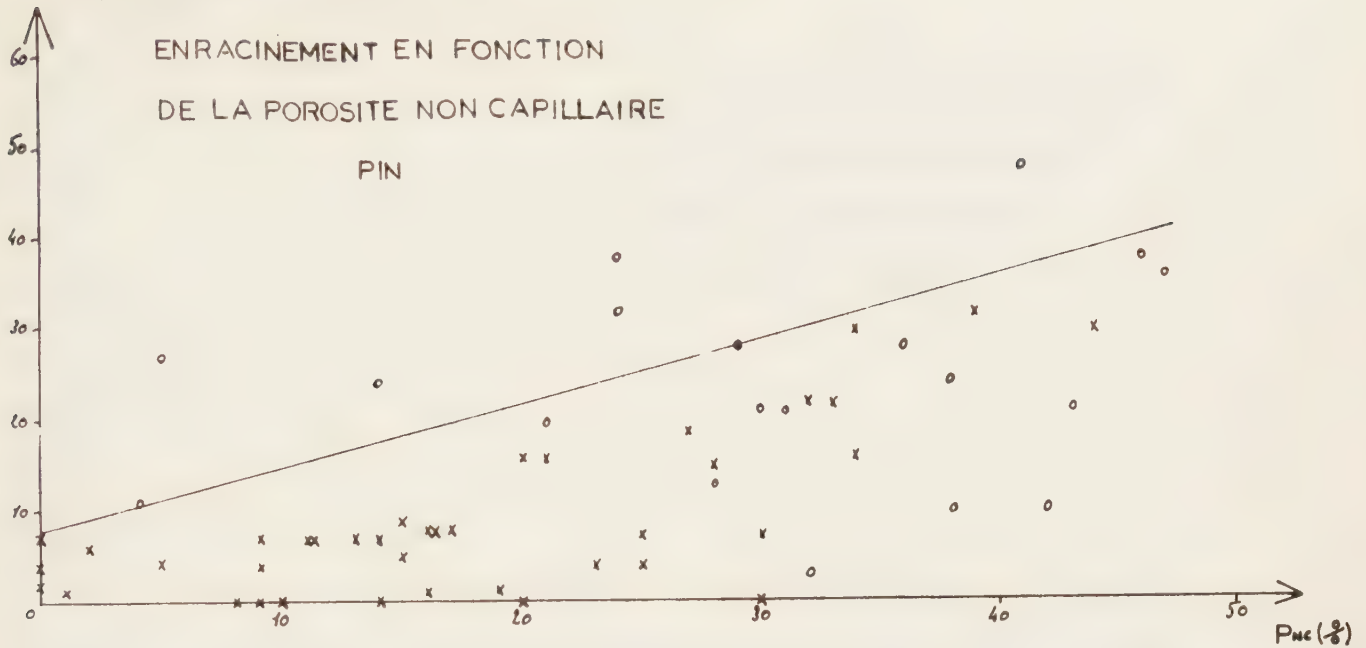
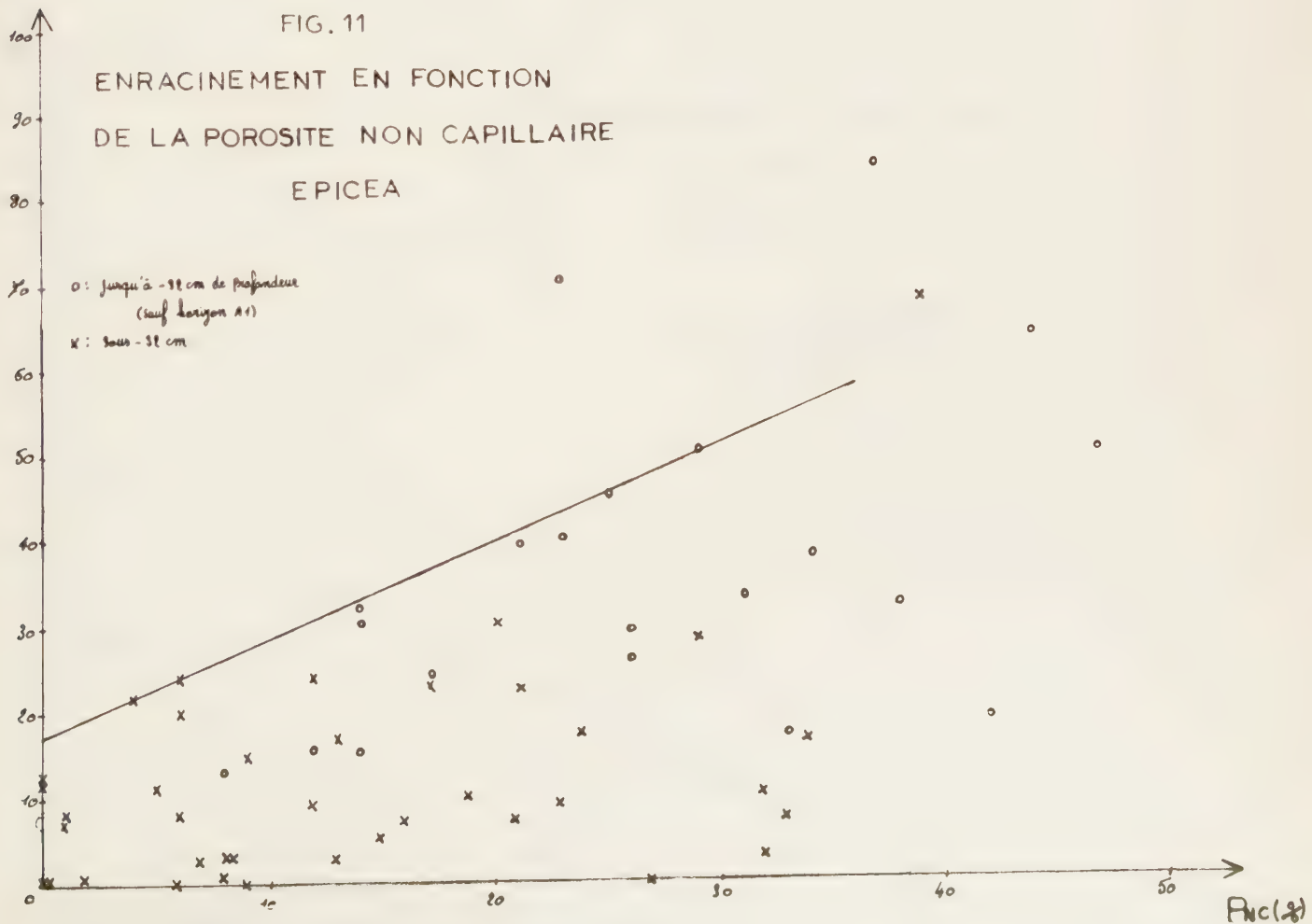


FIG. 11

ENRACINEMENT EN FONCTION DE LA POROSITE NON CAPILLAIRE

EPICEA



O : jusqu'à - 92 cm de profondeur
(sauf horizon A1)
X : sous - 92 cm

FIG. 12

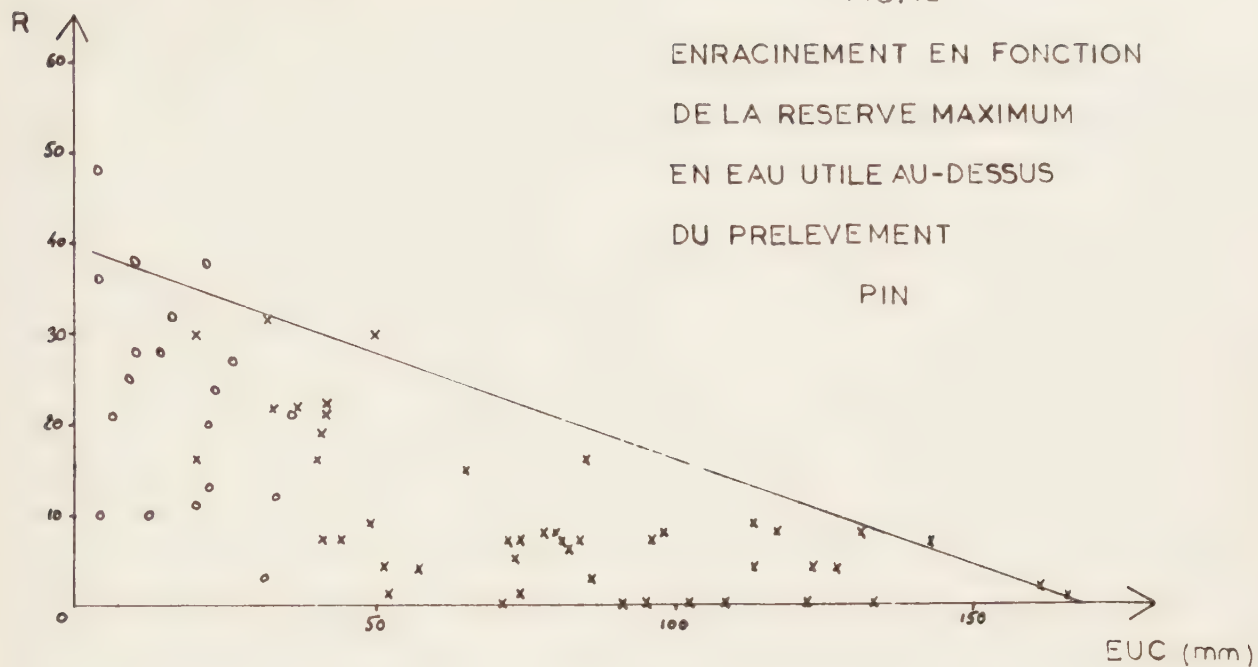
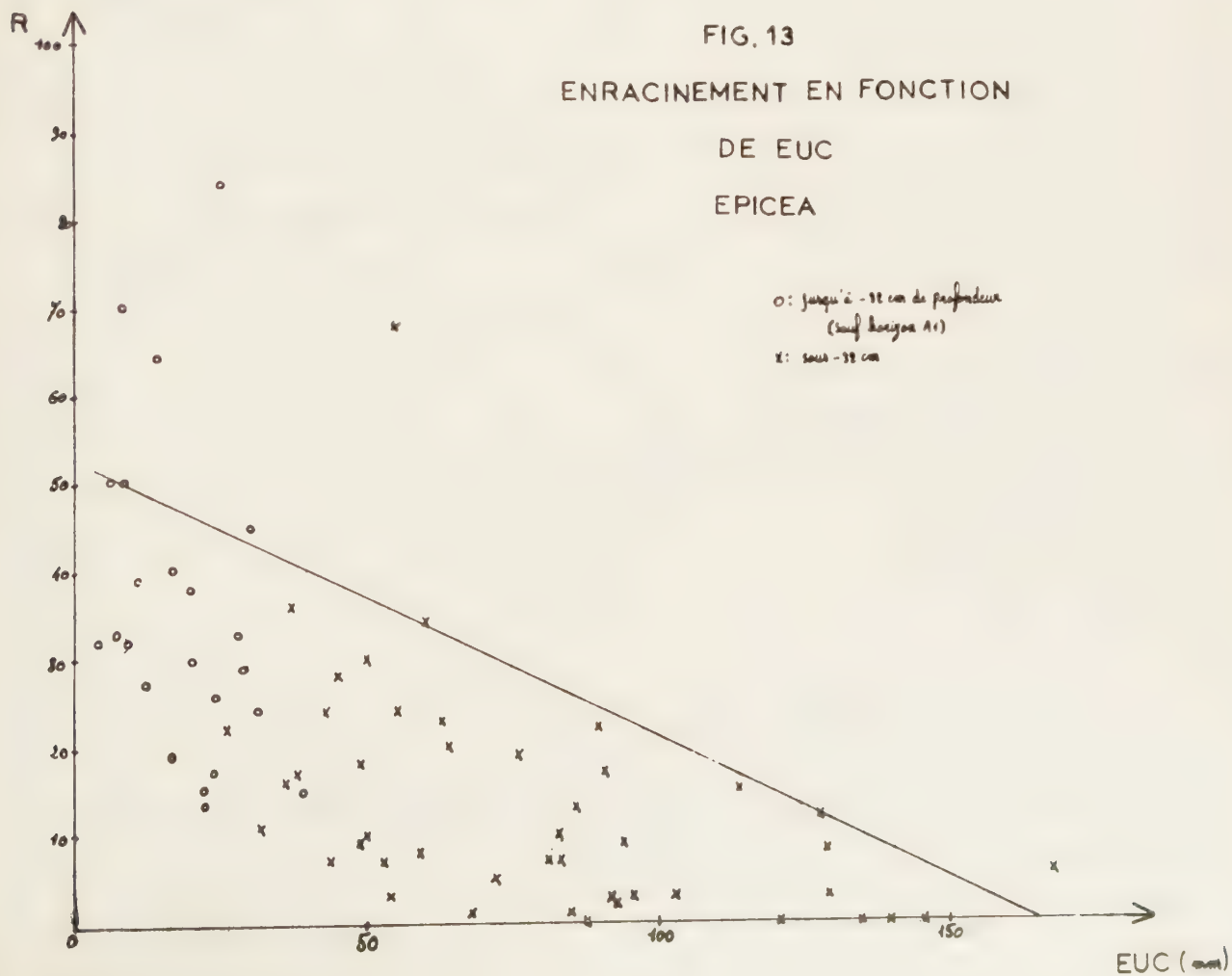
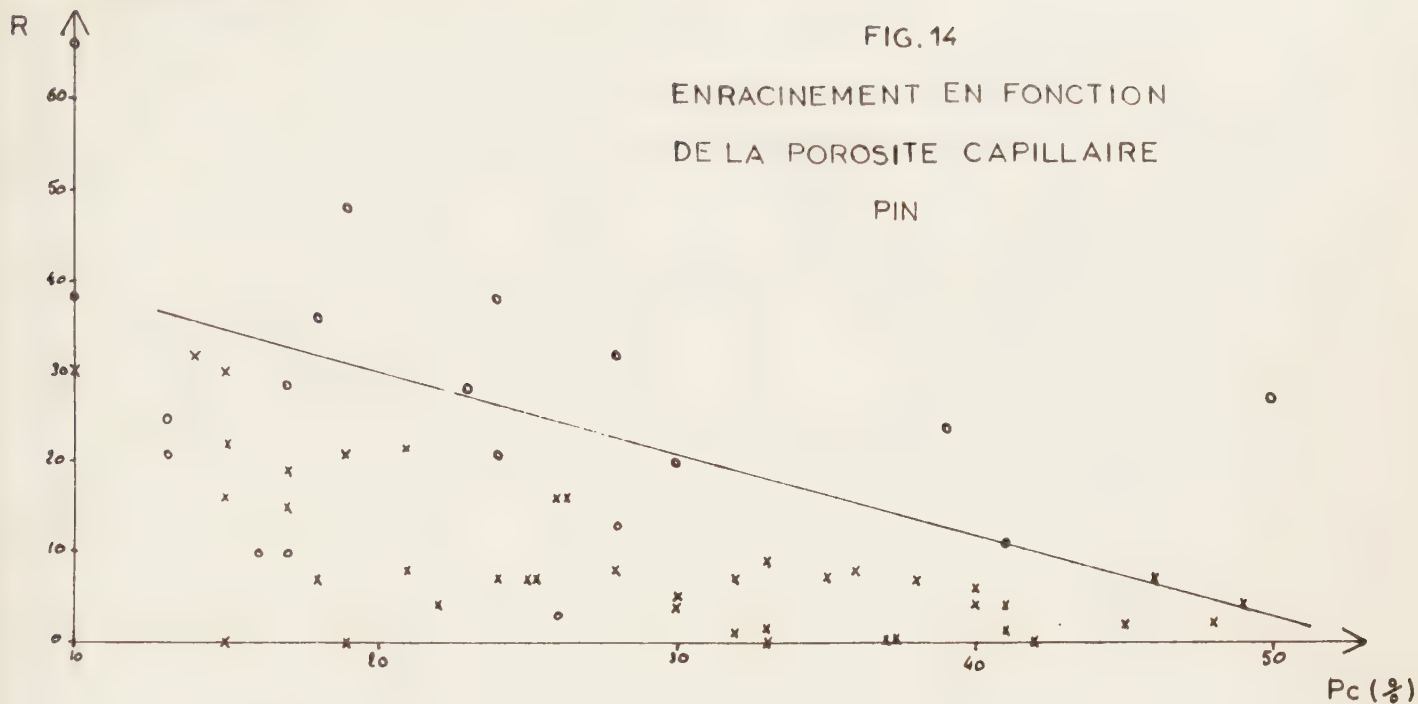


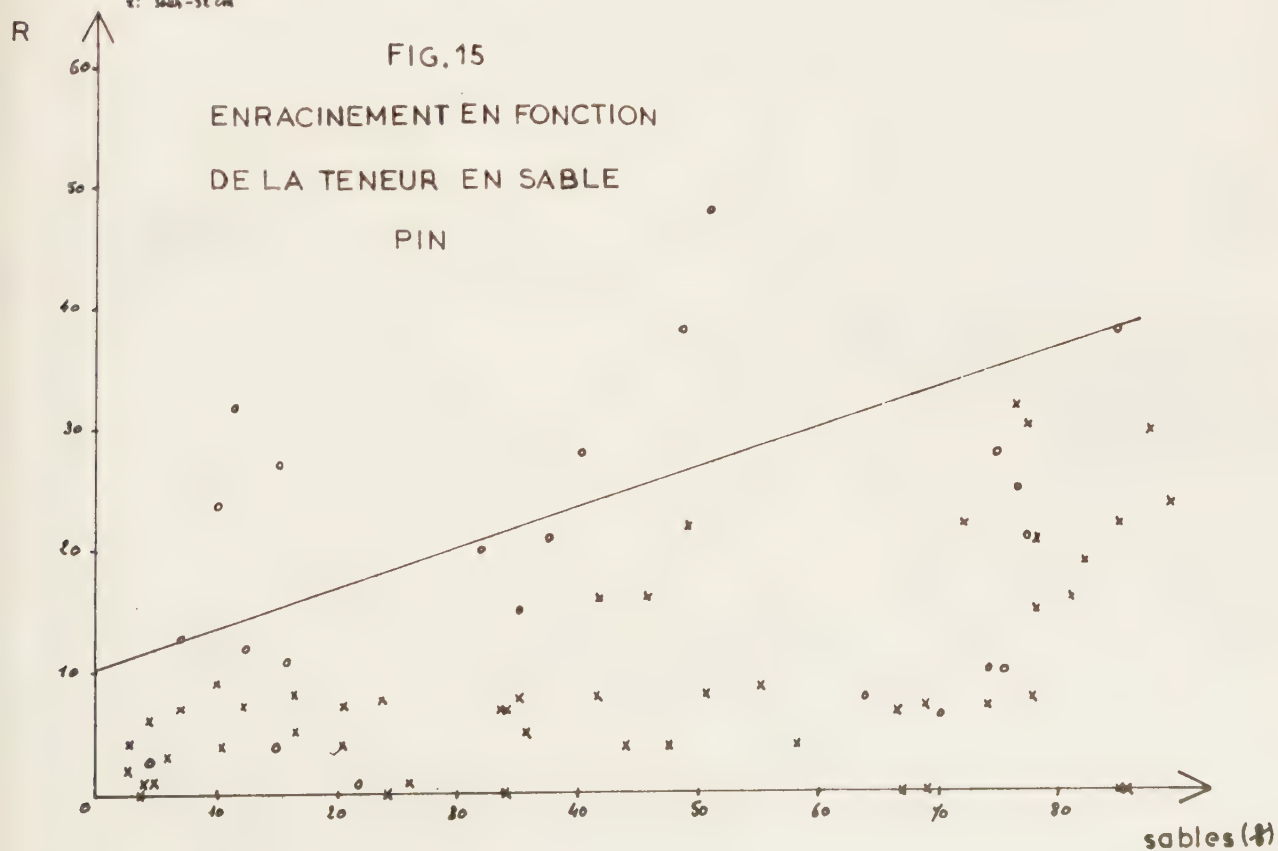
FIG. 13



O : jusqu'à - 32 cm de profondeur
(sauf horizon A1)
X : sous - 32 cm



O : jusqu'à - 32 cm de profondeur
(sauf horizon A1)
X : sous - 32 cm



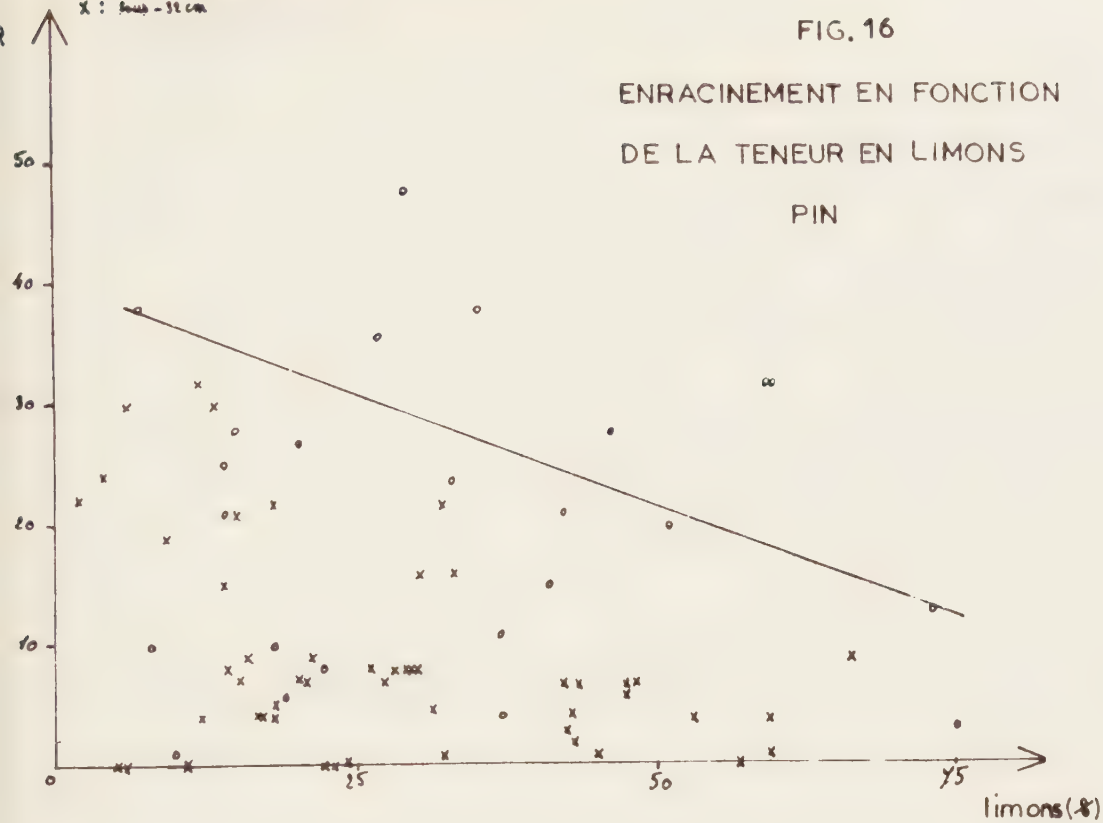
○ : jusqu'à -32 cm de profondeur
(sauf horizon A1)

× : sous -32 cm

FIG. 16

ENRACINEMENT EN FONCTION
DE LA TENEUR EN LIMONS

PIN



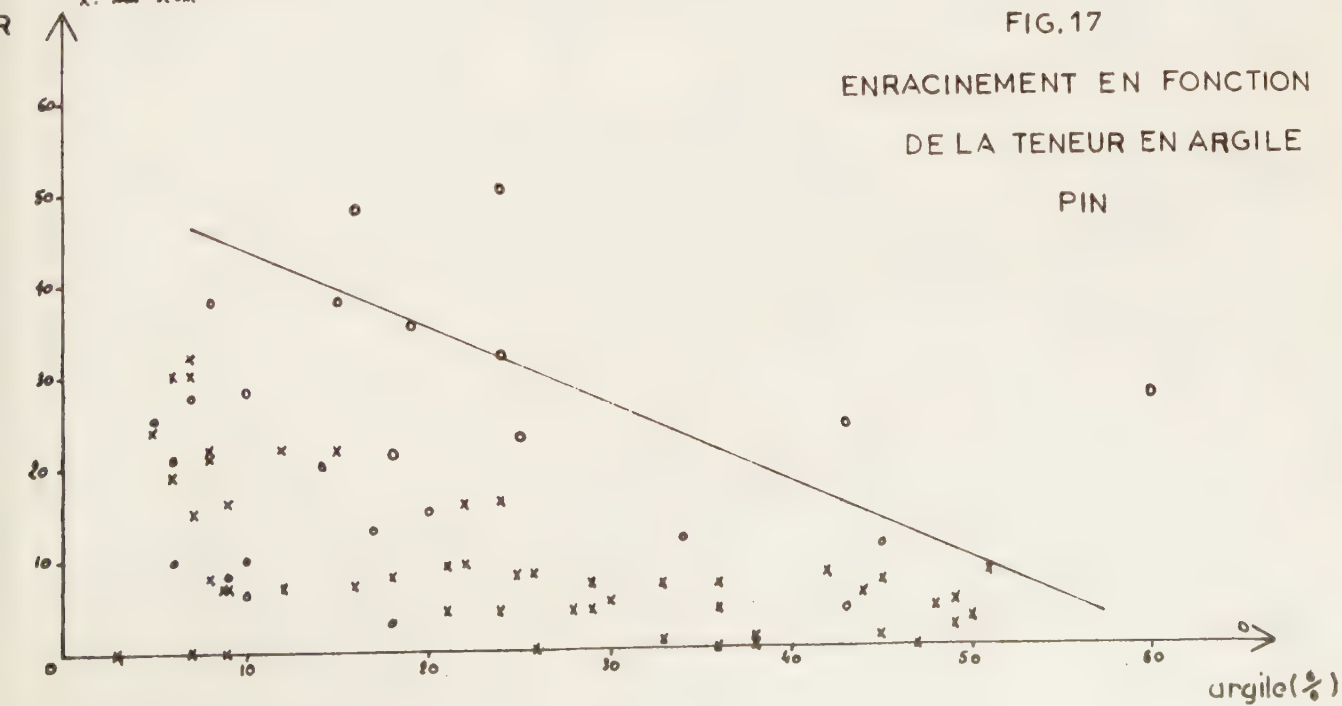
○ : jusqu'à -32 cm de profondeur
(sauf horizon A1)

× : sous -32 cm

FIG. 17

ENRACINEMENT EN FONCTION
DE LA TENEUR EN ARGILE

PIN



O: jusqu'à -32 cm de profondeur
(sauf horizon A1)
X: sous -32 cm

FIG. 18

ENRACINEMENT EN FONCTION
DU pH
PIN

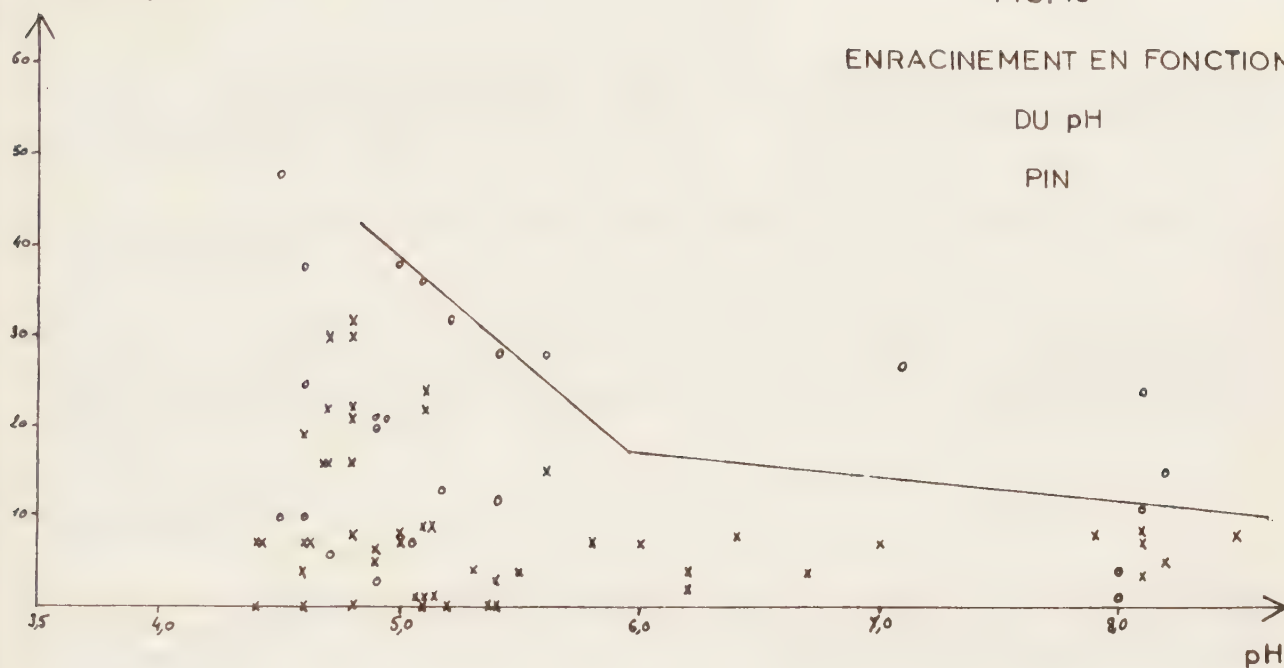
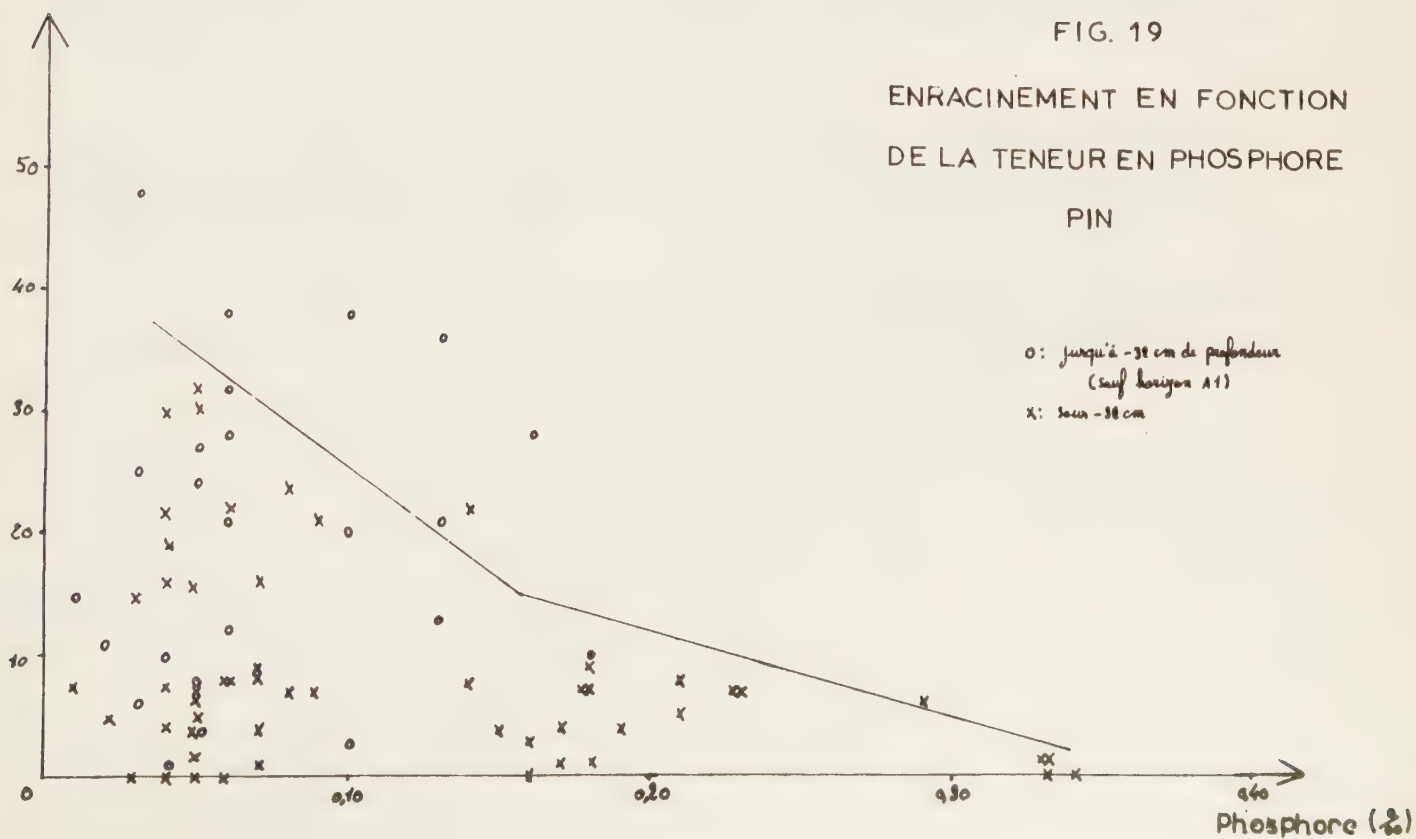


FIG. 19

ENRACINEMENT EN FONCTION
DE LA TENEUR EN PHOSPHORE
PIN

O: jusqu'à -32 cm de profondeur
(sauf horizon A1)
X: sous -32 cm



- de la tendance spécifique d'enracinement de l'essence considérée, dans la mesure où cette tendance existe en dehors de toute action des propriétés du sol.

- et surtout de l'action des différentes propriétés du sol à chaque profondeur.

Jusqu'à -32 cm, l'enracinement de l'Epicéa ne semble guère limité. Il n'en est de même pour le Pin que jusqu'à -10 cm. En dessous de -32 cm, les droites limites des deux essences sont pratiquement superposables.

REMARQUE -

On remarque que les points laissés au-delà des droites limites concernent presque toujours des horizons moins profonds que -32 cm; cela est sans doute dû au moins en partie à la perturbation apportée par les infiltrations de matière organique sous les horizons A1.

Ces droites limites ne pourront donc servir à la prévision des horizons où ont eu lieu de telles infiltrations. D'autres causes peuvent d'ailleurs, on le verra, diminuer la valeur de ces droites limites pour une prévision.

On peut constater, en résumé, que pour l'Epicéa, les droites limites sont fournies uniquement par des propriétés physiques. Pour le Pin, en plus des propriétés physiques, apparaissent deux variables chimiques : le phosphore et le pH.

L'importance relative pratique de ces différentes droites limites apparaîtra lorsqu'on abordera la prévision de l'enracinement.

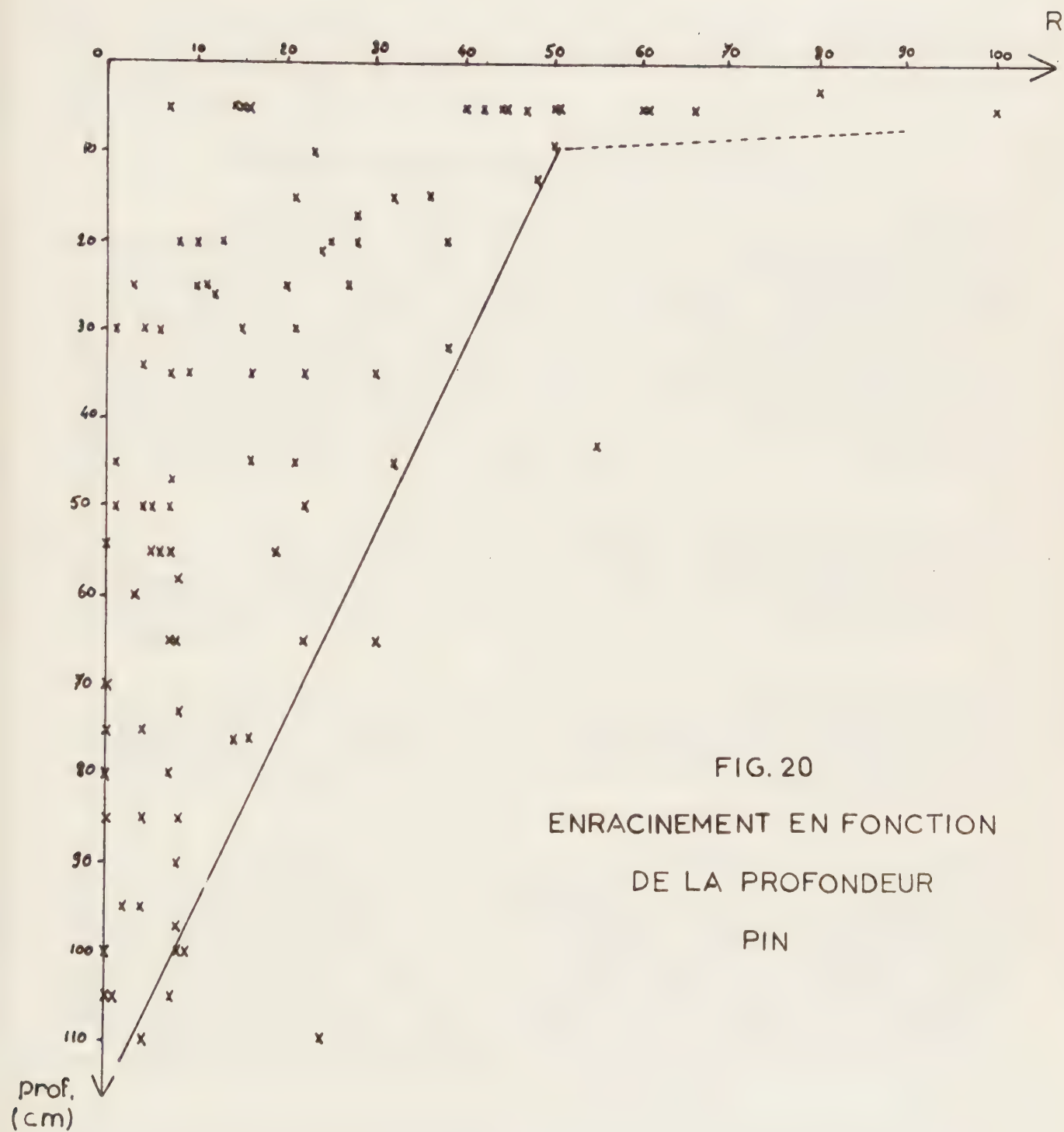


FIG. 20
ENRACINEMENT EN FONCTION
DE LA PROFONDEUR
PIN

II - LES COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE LES PROPRIETES DU SOL ET L'ENRACINEMENT -

1) Données de base pour les calculs statistiques :

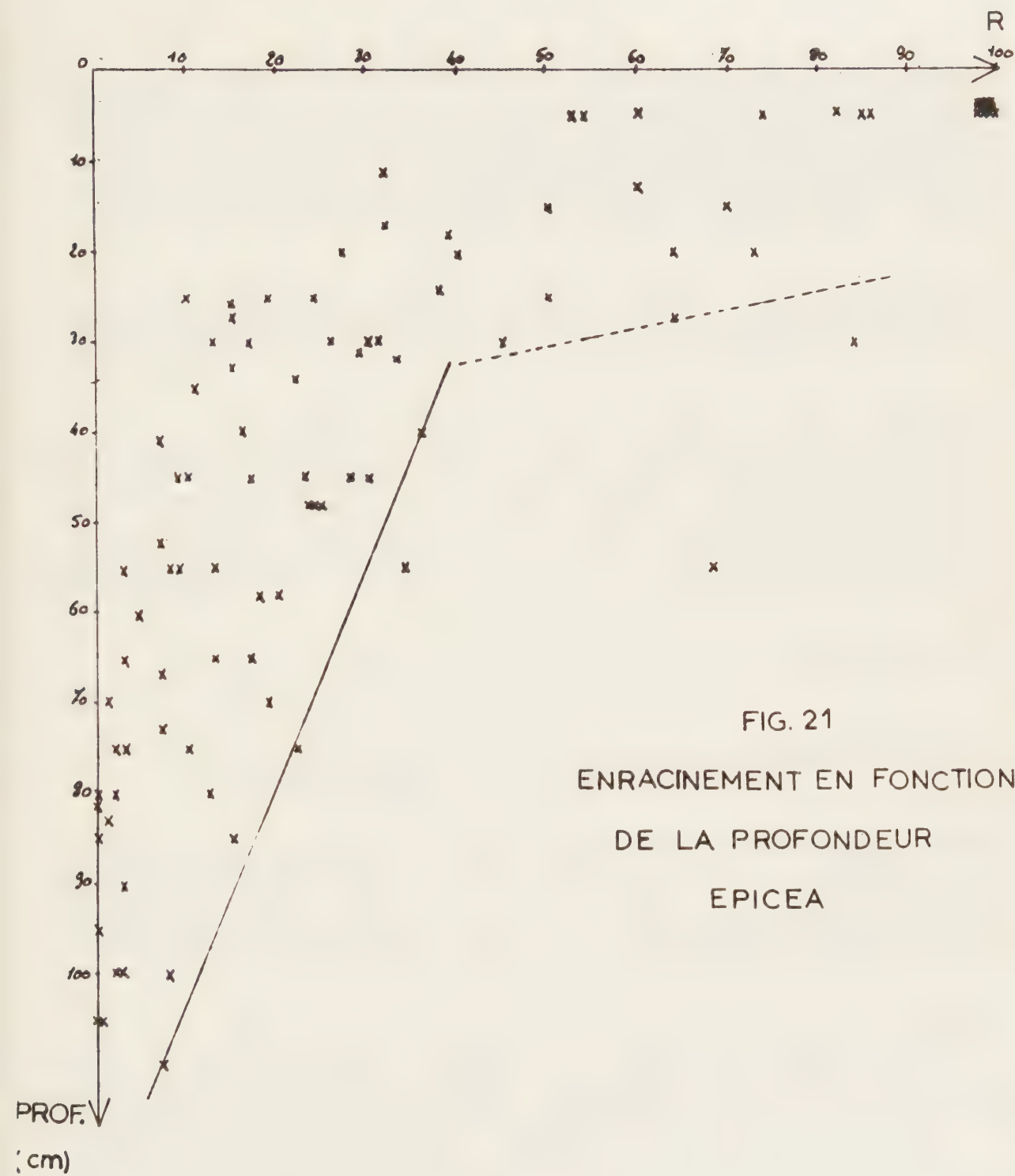
La station de Biométrie du C.N.R.F. a effectué sur ordinateur électronique l'ensemble des calculs statistiques, à l'aide des chiffres concernant les variables suivantes : l'âge du peuplement, la profondeur moyenne du prélèvement, la densité apparente, les 3 indices de stabilité structurale (I_s , K_p , Σ), la porosité capillaire, la réserve maximale en eau utile ($c - f$), les indices d'hydromorphie hyl et $hy2$, le maximum d'eau utile pouvant être stocké au-dessus du prélèvement (EUC), la profondeur maximale où l'on trouve une densité d'au moins 5 racines (Pr 5), la densité de racines non résineuses à diamètre $> 3/4$ mm, la matière organique, les rapports Ca^{++}/T , K^+/T et Al^{+++}/T , le phosphore, le pH et enfin la densité d'enracinement (variable à expliquer).

De plus, les valeurs du potassium (K^+/T) et du phosphore de l'horizon A1, ont été indiquées pour les horizons autres que A1 : en effet, la proportion dans laquelle l'alimentation d'un arbre est satisfaite dans l'horizon A1 influe peut-être sur l'enracinement des horizons situés plus profondément.

Pour des raisons de facilité de calcul, les variables explicatives (à comparer à l'enracinement) ont été groupées en : âge, profondeur, propriétés physiques, propriétés chimiques. La densité des racines non résineuses et la matière organique ont été intégrées aux propriétés physiques.

Certaines variables n'ont pas été utilisées pour l'étude statistique. En effet, d'une part, il ne fallait pas faire intervenir les variables qui se déduisent totalement et mathématiquement d'une ou plusieurs variables utilisées; d'autre part les tests statistiques perdent de leur précision lorsque le nombre des variables est trop important. A la lumière des résultats, on a pu regretter d'avoir utilisé telle variable plutôt que telle autre. Mais cette étude a donné un travail important à la station de Biométrie, et il était impossible pour éclaircir quelques points particuliers, de faire recommencer une partie des analyses statistiques.

Le calcium échangeable est indiqué sous la forme $Ca^{++}/T \times 100$, T représentant la somme calculée des cations du complexe; en effet, ce rapport est peut-être plus représentatif de l'influence du calcium sur l'arbre que la valeur absolue Ca^{++} ; il en est de même pour le potassium et l'aluminium. Le pH a été choisi de préférence au calcaire actif, car il différencie mieux l'ensemble des prélèvements.



Quant à l'enracinement, la densité des deux classes de diamètre ($\geq 3/4$ mm et ≥ 1 mm) a été indiquée; mais le coefficient de corrélation entre les deux catégories s'avérant très élevé (0,97), seule la première catégorie sera utilisée dans les analyses statistiques. Pour les densités d'enracinement très élevées la précision fournie n'est pas très valable : c'est pourquoi on a fixé arbitrairement la densité maxima d'enracinement à 99, cette valeur représentant déjà un très bon enracinement.

Un très petit nombre de prélèvements, dont l'enracinement dépendait visiblement beaucoup trop des conditions extérieures à l'horizon lui-même (par exemple présence d'une couche impénétrable juste sous le prélèvement) n'a pas été utilisé pour les analyses statistiques.

Les variables n'ont pas toutes été utilisées telles quelles : on a fait subir à certaines une transformation préalable, afin de rendre leur variance homogène; les nombres représentant un pourcentage ont été ainsi remplacés par l'arc sinus racine carrée de leur valeur; il s'agit de Σ , la porosité capillaire, c - f, l'argile, les limons, les cailloux, la matière organique, Ca/T, K/T, Al/T, P_2O_5 . Les nombres purs ont été remplacés par leur racine carrée : racines de Résineux et racines non résineuses.

Tous les résultats fournis par les calculs statistiques concernent ces variables transformées.

2) Les coefficients de corrélation entre les propriétés du sol et l'enracinement :

Les coefficients de corrélation totale entre deux variables (ici la densité d'enracinement et chaque propriété du sol) sont déduits des chiffres concernant seulement les deux variables en question, quelles que soient les valeurs prises par les autres variables. Des coefficients significatifs représentent bien des liaisons qui existent dans la nature, mais rappelons qu'il ne faut pas en déduire de relations de cause à effet.

De nombreuses variables physiques deviennent plus défavorables lorsque la profondeur augmente ; la densité d'enracinement diminue aussi en général avec la profondeur; c'est pourquoi un coefficient de corrélation totale significatif entre l'enracinement et l'une de ces variables ne nous fournira en fait pas de renseignements très utiles : il ne fera souvent que traduire l'action de la profondeur. Il serait beaucoup plus intéressant de connaître le coefficient de corrélation entre l'enracinement

et ces variables pour une même profondeur. Il en est un peu de la variable " âge du peuplement " comme de la profondeur : il serait intéressant de comparer l'enracinement à chaque propriété pour un âge donné. Les méthodes statistiques permettent de maintenir certaines variables artificiellement constantes. C'est pourquoi l'on a calculé les coefficients de corrélation de l'enracinement avec chaque propriété du sol en maintenant constants la profondeur et l'âge.

TABLEAU I

VARIABLES DONT LE COEFFICIENT DE CORRELATION AVEC LA DENSITE D'ENRACINEMENT R EST SIGNIFICATIF (1)

EPICEA			PIN		
Coefficients de corrélation totale, horizons organiques compris	Coefficients de corrélation à âge et profondeur constants (sans les horizons organiques)	Coefficients de corrélation totale horizons organiques compris	Coefficients de corrélation totale sans les horizons organiques	Coefficients de corrélation à profondeur et âge constants, sans horizons organiques	
<u>d'</u> <u>Σ</u> <u>mat.org.</u> <u>prof.</u> <u>EUC</u> <u>Is</u> <u>Kp</u> <u>Pc</u> <u>Hy2</u> <u>Hy1</u> <u>c-f</u> <u>Pr 5</u>	<u>Profondeur</u> (-0,75) <u>d'</u> <u>EUC</u> <u>mat.org.</u> <u>Σ</u> <u>Is</u> <u>Hy1</u> <u>Hy2</u>	<u>d'</u> <u>EUC</u> <u>mat.org.</u> <u>Prof.</u> <u>Is</u> <u>Hy1</u> <u>Hy2</u> <u>Σ</u> <u>Kp</u> <u>Pc</u>	<u>EUC</u> <u>Σ</u> <u>Prof.</u> <u>Hy1</u> <u>Is</u> <u>mat.org.</u> <u>Hy2</u> <u>Pc</u> <u>Kp</u> <u>P₂O₅</u> <u>d'</u> <u>argile</u> <u>Ca</u> <u>P₂O₅Al</u> <u>Limons</u>	<u>Limons</u> <u>P₂O₅</u> <u>P₂O₅Al</u> <u>Σ</u> <u>Is</u> <u>Ca</u> <u>Pc</u> <u>Al</u> <u>EUC</u> <u>Hy1</u> <u>Kp</u> <u>argile</u> <u>Ca</u> <u>P₂O₅Al</u> <u>Limons</u>	
(-0,81) (0,80) (0,78) (-0,77) (-0,72) (-0,70) (0,62) (-0,46) (-0,42) (-0,41) (-0,33) (-0,30)	(0,45) (0,38) (-0,38) (-0,35)	(-0,70) (-0,66) (0,65) (-0,62) (-0,61) (-0,55) (-0,51) (0,51) (0,41) (-0,61)	(-0,70) (0,63) (-0,63) (-0,61) (-0,60) (0,54) (-0,53) (-0,52) (0,51) (-0,49) (-0,47) (-0,47) (-0,41) (-0,31) (-0,28)	(-0,42) (-0,41) (-0,39) (0,39) (-0,37) (-0,36) (-0,35) (0,33) (-0,32) (-0,32) (0,31) (-0,30)	

(1) Les coefficients de corrélation soulignés de 2 traits sont significatifs au seuil de 1%, ceux soulignés d'1 trait le sont au seuil de 1%, ceux non soulignés le sont au seuil de 5%.

COMMENTAIRE

La variable " âge " a un coefficient de corrélation avec R très faible; c'est donc principalement la profondeur, et non l'âge, qui est responsable de la différence que subissent, par rapport aux coefficients de corrélation totale, les coefficients de corrélation à profondeur et âge constants.

Nous remarquons que la plupart des variables physiques ont un coefficient de corrélation totale avec R très significatif (au seuil de 1%° en général, parfois 1%) lorsque l'on tient compte des horizons organiques. Il en est à peu près de même si l'on considère les coefficients de corrélation totale calculés uniquement pour les horizons non organiques; cependant, certaines liaisons avec R disparaissent; d'autres, au contraire, qui étaient masquées par les horizons organiques, apparaissent: elles concernent le calcium (pour les deux essences), l'argile, les limons et le phosphore de Al (pour le Pin).

Mais, à profondeur constante, de nombreuses liaisons concernant les propriétés physiques disparaissent ou sont beaucoup moins significatives: elles n'apparaissent qu'à cause de l'action perturbatrice de la profondeur.

En définitive, à une même profondeur, l'enracinement est favorisé:

- par une stabilité structurale (principalement l'indice Σ) élevée et une faible teneur relative en calcium (Ca^{++}/T bas), pour les deux essences,

- par une faible densité apparente, pour l'Épicéa, et une faible teneur en limons et en phosphore, pour le Pin.

COMPARAISON AVEC LES GRAPHIQUES

Il ne faut pas rechercher dans les graphiques tracés précédemment une illustration exacte des coefficients de corrélation, car la plupart des variables a subi une transformation pour l'étude statistique.

Les variables qui avaient permis le tracé d'une droite limite, correspondent, dans l'ensemble, à celles dont le coefficient de corrélation total avec R, sans les horizons organiques, est très significatif. Cependant, certaines variables, dont le coefficient de corrélation avec R est élevé,

TABLEAU 2

VARIABLES DONT LE COEFFICIENT DE CORRELATION PARTIELLE AVEC R
EST SIGNIFICATIF (1)

EPICEA					PIN						
Tous horizons			Horizons non organiques (2)			Tous horizons			Horizons non organiques (2)		
Variable	t	signe du coefficient	Variable	t	signe du coefficient	Variable	t	signe du coefficient	Variable	t	signe du coefficient
<u>Potassium</u>	3,46	+	(Potassium de Al)	1,97	-	<u>c - f</u>	3,17	+	Phosphore	2,70	-
<u>Racines non résineuses</u>	2,84	-				<u>Matière org.</u>	2,90	+	Hyl	2,69	-
Pr 5	2,49	-				Racines non résineuses	2,21	-	Matière org.	2,37	+
Hy2	2,16	+							pH	2,12	-
(pH)	1,97	-							Hy2	2,10	+

(1) Les coefficients de corrélation partielle sont testés par la valeur t de Student.

Les variables dont le coefficient de corrélation partielle avec R est significatif à 1% sont soulignées.

Les variables non soulignées ont un coefficient de corrélation partielle avec R significatif à 5%.

Les variables entre parenthèses ont un coefficient de corrélation partielle avec R presque significatif à 5%
(t très proche du seuil).

(2) On n'a pas calculé les coefficients de corrélation partielle des variables " racines non résineuses " et " Pr 5 " avec R dans le cas des horizons non organiques seuls.

par exemple la matière organique, n'ont pas permis le tracé d'une droite limite intéressante : rappelons que droite limite et droite de régression intéressantes ne correspondent pas forcément aux mêmes variables.

Les coefficients de corrélation à profondeur constante sont difficiles à illustrer de façon très satisfaisante. Cependant des graphiques par catégories de profondeur (que nous n'avons pas reproduit ici) peuvent les représenter dans une certaine mesure. Ces graphiques montrent en général une liaison avec R, dans les catégories de profondeur situées sous -32 cm, pour les variables suivantes :

- Σ , pour les deux essences,
- P_{205} , les limons et les sables, pour le Pin, c'est à dire,

pour les variables ayant les coefficients de corrélation avec R à profondeur constante les plus élevés, plus les sables. On peut donc supposer que les sables, non utilisés dans l'étude statistique, ont un coefficient de corrélation avec R, à profondeur constante significatif (positif) pour le Pin (d'autant plus que ce coefficient est significatif et de même signe pour les limons et l'argile).

3) Les coefficients de corrélation partielle entre les propriétés du sol et l'enracinement :

Les coefficients de corrélation totale et les coefficients de corrélation à âge et profondeur constants nous ont indiqué des liaisons que l'on peut observer dans la nature. Mais ils ne sont pas entièrement satisfaisants pour l'explication réelle de l'enracinement : un coefficient de corrélation significatif entre R et une variable peut n'être en fait que le reflet de l'action d'une autre variable sur R.

C'est pourquoi l'on a calculé les coefficients de corrélation partielle de chaque variable avec R, toutes les autres variables étudiées étant maintenues artificiellement constantes. Un coefficient de corrélation partielle significatif ne peut être le reflet de l'action d'une autre variable étudiée; cependant on ne pourra non plus en déduire automatiquement qu'il s'agit d'une relation de cause à effet, car nous avons observé, et non expérimenté, donc toutes les variables susceptibles d'agir sur R n'ont pas été étudiées (oligoéléments, etc...)

COMMENTAIRE

Les variables qui apparaissent dans ce tableau sont fort différentes, en général, des variables dont le coefficient de corrélation totale ou le coefficient de corrélation à profondeur et âge constants, avec R, était significatif. En particulier presque toutes les propriétés physiques (texture, structure) ont disparu. Mais cela est normal; la plupart des variables très liées entre elles ne peuvent avoir un coefficient de corrélation partielle avec R significatif : dans le calcul de l'un de ces coefficients, toutes les autres variables sont maintenues artificiellement constantes. Par exemple, il est normal que le coefficient de corrélation partielle de $\sum$ et de R ne soit pas significatif, car Is, Kp, d', etc... sont maintenues constantes : les possibilités de variation de $\sum$ sont alors très réduites. C'est l'un des inconvénients de la méthode.

Un autre de ses défauts est la difficulté d'interprétation de certains coefficients significatifs; ainsi, quelle est la signification exacte d'une liaison entre c - f et R, lorsque la texture, la matière organique, la stabilité structurale, etc... sont maintenues constantes ?

Quoiqu'il en soit, cette étude présente l'intérêt de confirmer la liaison avec R de certaines variables :

- en premier lieu, pour le Pin, l'intensité d'hydromorphie Hyl et surtout le phosphore, liés négativement à R, dont les coefficients de corrélation totale et à profondeur et âge constants, avec R, étaient significatifs,
- la matière organique pour le Fin (liaison positive avec R), Pr 5 pour l'Epicéa (liaison négative), dont le coefficient de corrélation totale avec R était significatif.

De plus, cette étude fait apparaître de nouvelles variables, dont la liaison avec R était masquée par la variation de certaines autres propriétés :

- les racines non résineuses et le pH, liés négativement à R, pour les deux essences,
- le potassium (liaison positive avec R) et le potassium de Al (liaison négative), pour l'Epicéa,
- c - f, lié positivement à R, pour le Pin.

Hy2 a une liaison positive avec R pour les deux essences, alors que son coefficient de corrélation totale avec R était négatif. Il ne faut pas y voir une anomalie, car son coefficient de corrélation totale n'est sans doute, comme beaucoup d'autres, que la conséquence de l'action perturbatrice de la profondeur.

4) Les composantes principales :

a) Intérêt de l'analyse des composantes principales :

Le calcul des coefficients de corrélation partielle entre chaque variable et l'enracinement ne nous a pas donné entière satisfaction, surtout pour les variables très liées entre elles, comme la plupart des propriétés physiques : ces variables disparaissent artificiellement, et l'on ne peut tirer aucune conclusion en ce qui les concerne.

L'analyse de composantes principales permet de supprimer en grande partie cet inconvénient; elle consiste à remplacer les variables individuelles par des combinaisons de variables (les " composantes principales ") de telle manière que chaque combinaison soit indépendante des autres; le fait, dans le calcul du coefficient de corrélation partielle entre chaque composante et l'enracinement, de maintenir constantes les autres composantes n'est plus gênant.

Les composantes principales ont été calculées séparément pour l'Epicéa et le Pin, en raison de la présence de variables telles que les racines non résineuses (qui sont en général plus fréquentes sous Pin) ou la profondeur maxima d'enracinement Pr 5.

b) Les composantes principales intéressantes :

Nous ne retiendrons pour chaque essence que celles des composantes dont le coefficient de corrélation partielle avec R est significatif. De plus, chaque composante principale se présentant sous la forme d'une somme de variables affectées de coefficients, nous ne donnerons qu'une formule simplifiée des composantes en ne retenant que les variables dont le coefficient est élevé (supérieur au coefficient maximum divisé par $\sqrt{2}$, ce qui correspond à une importance allant du simple au double).

- Epicéa -

- La 1ère composante physique est celle-ci :

$$\begin{aligned}
 & - 0,35 \text{ Is} + 0,34 \sum - 0,34 \text{ EUC} - 0,32 \text{ Hy2} - 0,31 \text{ d}' \\
 & - 0,31 \text{ Hy1} - 0,29 \text{ Pc} + 0,28 \text{ Mat.org.} + 0,25 \text{ Kp...}
 \end{aligned}$$

Cette composante exprime une propriété synthétique; elle regroupe les variables dont dépend la structure et sa stabilité. Elle traduit 44% de la variation totale des variables physiques : on peut donc affirmer qu'elle distingue les différents prélèvements quant à leur structure d'une façon bien plus sensible que n'importe laquelle des variables qui la composent.

- La 2ème composante physique est la suivante :

$$0,48 \text{ argile} - 0,41 (c - f) \dots$$

Elle apparaît liée à la texture et à certaines de ses conséquences : elle oppose les textures très argileuses (ou argilo-sableuses), dont la capacité en eau utile est relativement faible, aux textures plus limoneuses à capacité plus élevée.

- La 3ème composante chimique est formée essentiellement du potassium, dont le coefficient est de 0,79.

- Pin -

- Les cailloux jouent un rôle prépondérant dans la 3ème composante physique, leur coefficient y est de 0,79.

- La 2ème composante chimique est formée essentiellement du phosphore, dont le coefficient est de 0,87.

c) Les coefficients de corrélation partielle entre l'enracinement et les composantes principales :

L'analyse de régression progressive a été effectuée sur les variables : profondeur, âge, composantes physiques, composantes chimiques. Ses résultats sont les suivants :

TABLEAU 3

VARIABLES DONT LE COEFFICIENT DE CORRELATION PARTIELLE
AVEC R EST SIGNIFICATIF (1)

EPICÉA			PIN		
Variable	t	Signe du coefficient	Variable	t	Signe du coefficient
<u>2ème composante</u> physique	5,49	+	3ème composante physique	2,13	+
<u>1ère composante</u> physique	3,22	+	2ème composante chimique	2,03	-
3ème composante chimique	2,13	+			

(1) La composante soulignée de 2 traits a un coefficient significatif à 1%; celle soulignée d'un trait a un coefficient significatif à 1%. Les composantes non soulignées ont un coefficient significatif à 5%.

COMMENTAIRES

Des liaisons qui apparaissent déjà précédemment sont confirmées; elles concernent :

- Pour le Pin :

- Le phosphore (lié négativement à R), dont tous les coefficients de corrélation (totale, à profondeur et âge constants, et partielle) calculés précédemment, étaient déjà significatifs.

- Pour l'Epicéa :

- Le potassium, lié positivement à R. Son coefficient de corrélation partielle avec R était déjà significatif.

- La structure et sa stabilité. Certaines variables dont dépend la structure, avaient un coefficient de corrélation avec R, à profondeur et âge constants significatif; mais ces variables sont très liées entre elles, ce qui explique

leur faible coefficient de corrélation partielle avec R. Les composantes principales font réapparaître ces variables sous forme groupée, synthétique, représentant bien la réalité. Cela confirme que l'enracinement de l'Epicéa est favorisé par une structure stable, indépendamment des autres variables et en particulier de la profondeur.

De plus, certaines liaisons nouvelles apparaissent :

- l'enracinement de l'Epicéa, dans un horizon donné, est plus favorisé par une texture argileuse ou argilo-sableuse que par une texture plus limoneuse,
- quant à la liaison positive entre les cailloux et R, du Pin, son interprétation semble difficile; elle demande confirmation.

CHAPITRE II

PREVISION DE L'ENRACINEMENT

I - PREVISION A L'AIDE DES DROITES LIMITES -

De chaque droite limite l'on peut tirer, pour un certain prélèvement, l'enracinement maximum que permettrait la variable en question. Les diverses droites limites fournissent donc, pour ce prélèvement, différents chiffres de maximum possible d'enracinement; le plus faible de ces chiffres constitue l'enracinement maximum possible autorisé par l'ensemble des propriétés du sol.

Il s'avère que ces chiffres ne proviennent pas d'une façon égale des différentes droites limites : certaines d'entre elles sont pratiquement négligeables de ce point de vue; en effet, elles ne sont la droite la plus limitante que pour un assez petit nombre de prélèvements qui, de plus, admettent en général une autre droite aussi limitante ou presque. Nous ne les utiliserons pas pour la prévision.

Nous n'avons ainsi retenu que les droites limites fournies par les variables suivantes :

- Epicéa : d' , I_s , $\log 10 K_p$, $\sum$, profondeur.
- Pin : d' , I_s , $\sum$, pH, P_2O_5 .

1) Conditions nécessaires pour obtenir un enrachinement donné :

Les conditions ci-après sont toutes nécessaires, mais l'enracinement n'atteint pas obligatoirement la valeur indiquée; on peut supposer que l'enracinement est alors peut-être limité par d'autres variables, non étudiées. D'autre part un très petit nombre d'horizons peut atteindre la valeur d'enracinement indiquée même si toutes les conditions ne sont pas remplies (points situés au-delà des droites limites).

EPICÉA

R	d'	Is (l)	log 10 Kp	Σ	Profondeur (cm)
5	< 1,68	(< 4,00)	> 0,79	> 40	< 115
10	< 1,61	(< 3,50)	> 0,93	> 45	< 105
20	< 1,49	(< 3,00)	> 1,27	> 55	< 80
30	< 1,36	< 1,13	> 1,58	> 65	< 55
40	< 1,23	< 0,65	> 1,90	> 75	< 33

PIN

R	d'	Is (l)	Σ	P ₂ O ₅ (‰)	pH
5	< 1,72	(< 4,00)	> 51	< 0,30	
10	< 1,64	< 1,50	> 59	< 0,23	< 3,5
20	< 1,48	< 0,80	> 75	< 0,13	< 5,8
30	< 1,32	< 0,60	> 91	< 0,07	< 5,4
35	< 1,24	< 0,47	> 98	< 0,05	< 5,2

TABEAU 4

(1) Les chiffres entre parenthèses sont très approximatifs, car ils proviennent d'une extrapolation.

2) Comparaison de l'enracinement maximum autorisé par les droites limites (R_d) et de l'enracinement observé (R_o) (fig. 22 et 23) :

Nous avons représenté sur un graphique , pour les différents prélèvements, R_d en fonction de R_o , et examiné la position des points par rapport à la bissectrice de l'angle formé par les axes de coordonnées (un point sur la bissectrice admet $R_o = R_d$).

Il est normal que la coïncidence entre R_o et R_d ne soit pas parfaite, car R_d ne représente que le maximum possible de l'enracinement (en général $R_d \geq R_o$).

D'autre part, pour un petit nombre de prélèvements (ceux dont les points représentatifs ont été laissés au-delà des droites limites), R_d est inférieur à R_o .

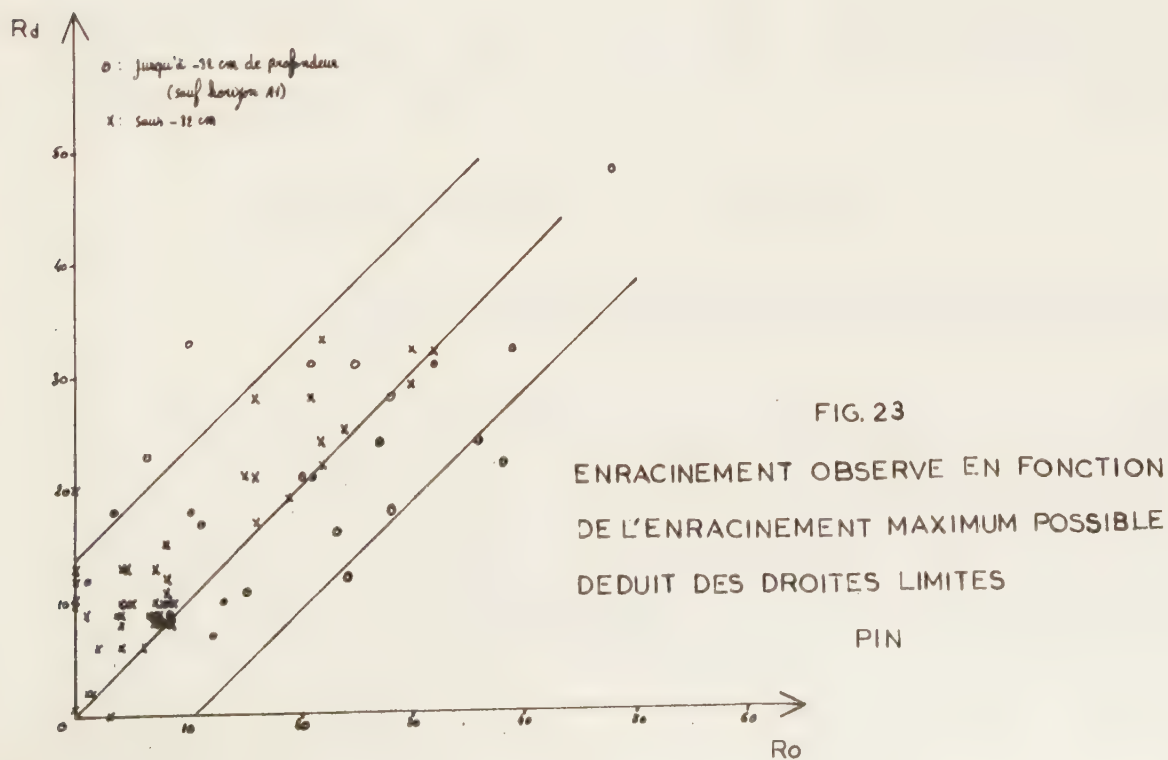
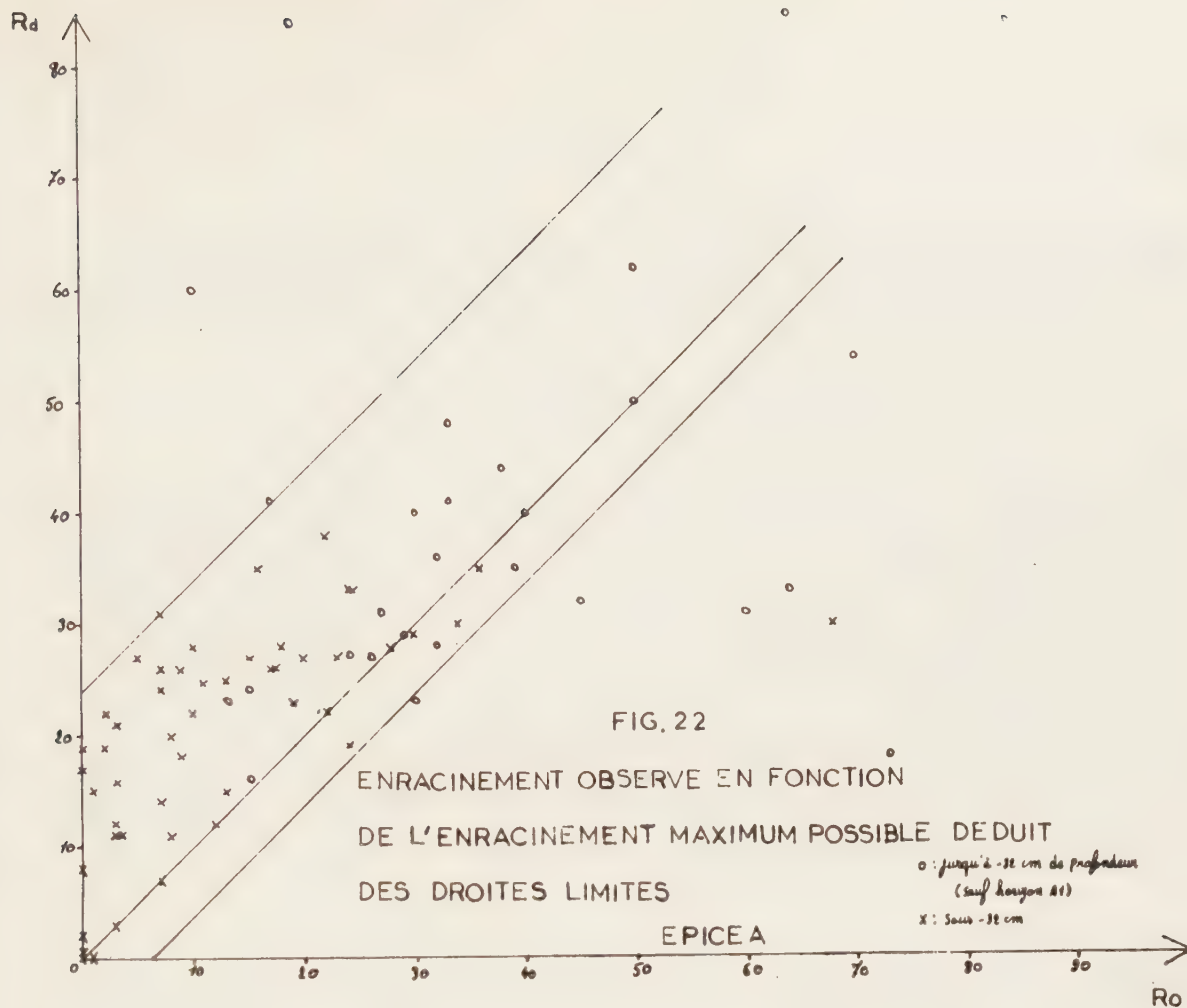
En fait, pour les deux essences, les points représentatifs ne sont souvent pas très éloignés de la bissectrice : R_d n'est, en général, pas tellement différent de R_o ; cela s'explique par le fait qu'on a considéré pour chaque prélèvement la droite limite la plus pessimiste.

Les quelques prélèvements pour lesquels R_d est nettement $< R_o$, proviennent presque tous d'une profondeur inférieure à -32 cm, ce que l'on savait; mais il en est de même pour les prélèvements où R_d est le plus fortement $> R_o$.

L'on peut donc se faire une certaine idée de l'enracinement (pour une prévision) à l'aide des droites limites, surtout pour les horizons situés sous -32 cm. Ce n'est en fait qu'un ordre de grandeur, la précision étant assez médiocre; par exemple, pour l'Epicéa, à $R_d = 30$ correspondra un enracinement réel compris entre 6 et 36 (en général ≤ 30).

II - PREVISION A L'AIDE DE FORMULES FOURNIES PAR L'ANALYSE STATISTIQUE -

L'étude des corrélations nous a montré quelles étaient les variables les plus liées à l'enracinement R . Chacune de ces variables pourrait servir de base à la prévision de R d'un horizon.



Mais l'étude statistique qui a été effectuée nous fournit également des formules permettant de calculer R d'une façon plus précise, à l'aide de plusieurs variables intégrées dans une même formule.

1) L'analyse de régression progressive :

L'analyse de régression progressive a été employée pour fournir les coefficients de corrélation partielle de chacune des variables avec R. Mais cette méthode a un autre avantage pour nous : elle consiste à établir un certain nombre d'équations successives dites équations de régression multiple qui permettent de calculer R. La 1ère de ces équations (celle du 1er palier de la régression progressive) permet de calculer R à l'aide d'une seule variable, celle dont le coefficient de corrélation totale avec R est le plus élevé. Dans la 2ème équation (donc au 2ème palier) se trouve, en plus de cette 1ère variable, une 2ème variable explicative, celle qui fournit l'information supplémentaire maxima; la valeur de R donnée par cette 2ème équation est évidemment plus précise que celle calculée à l'aide de la première équation. Et ainsi de suite, jusqu'au dernier palier, où l'équation qui permet de calculer R comporte toutes les variables étudiées.

Quelle équation choisir pour calculer R ? La plus précise serait évidemment celle du dernier palier (son coefficient de corrélation multiple est le plus élevé); mais son emploi nécessiterait la mesure d'un grand nombre de variables. En fait, l'augmentation de ce coefficient de corrélation multiple est de plus en plus faible d'un palier au suivant, c'est à dire au fur et à mesure que l'on introduit de nouvelles variables; les dernières variables introduites n'augmentent pratiquement plus la précision obtenue pour R. L'on peut choisir l'une ou l'autre des équations suivant la précision désirée et le temps dont on dispose.

2) Formules utilisées à titre d'exemple :

a) Equation du 7ème palier de la régression effectuée pour l'ensemble des horizons, pour l'Épicéa (fig.25) :

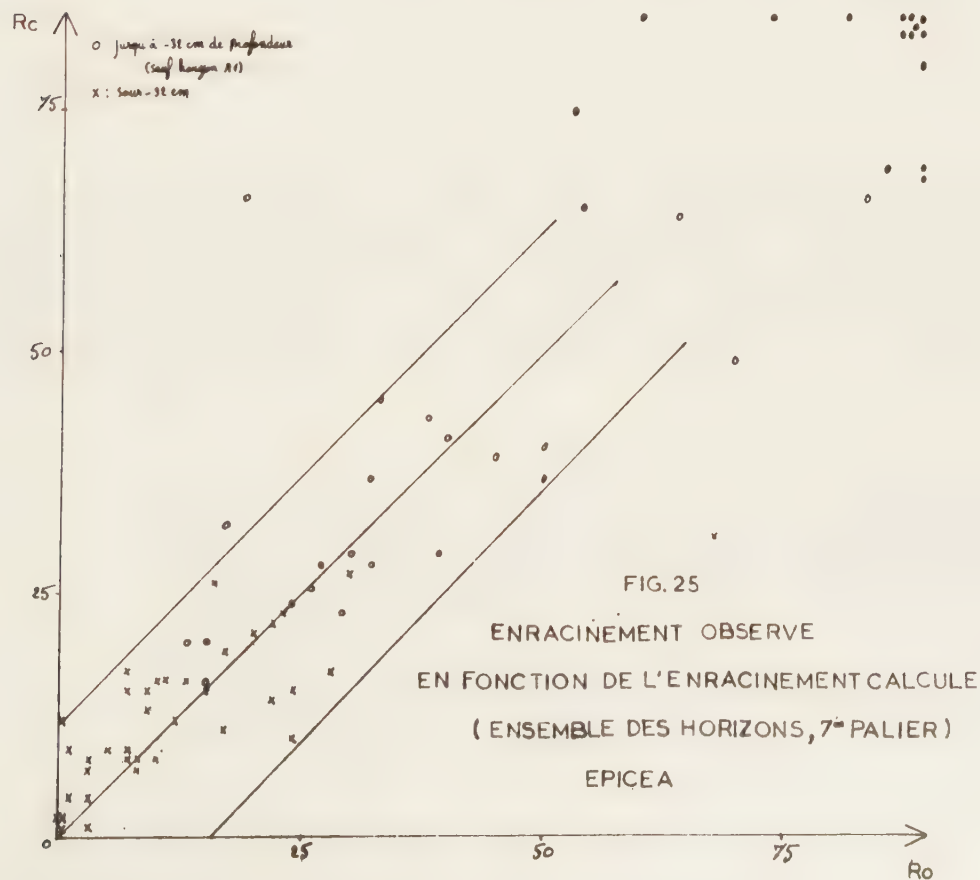
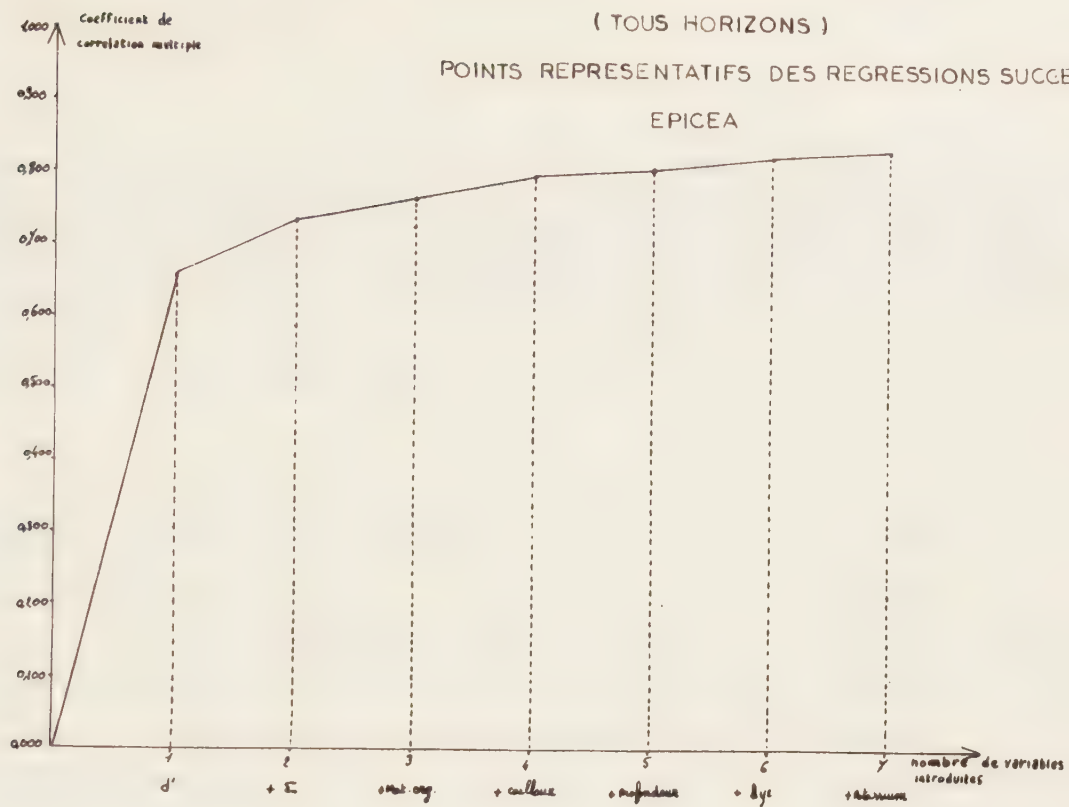
Les résultats d'une analyse de régression progressive peuvent être schématisés sur un graphique où l'on représente en abscisse le nombre de variables introduites et en ordonnée, les coefficients de corrélation multiple. Les différents points représentent les équations de régression successives. Le point correspondant à une abscisse de 1 représente l'équation à 1 variable, etc... La figure 24 concerne la régression progressive effectuée pour l'ensemble des horizons, organiques compris, pour l'Épicéa. On peut y vérifier que l'augmentation du coefficient de corrélation multiple est de plus en plus faible à mesure que l'on avance de palier. Au 7ème

FIG. 24

ANALYSE DE REGRESSION PROGRESSIVE

(TOUS HORIZONS)

POINTS REPRESENTATIFS DES REGRESSIONS SUCCESSIVES



palier, il est égal à 0,833, c'est à dire que 83% de la variation de l'enracinement de l'ensemble des stations étudiées est expliquée par l'introduction des 7 premières variables; il n'augmente que de 0,056 du 7ème au 22ème et dernier palier. C'est pourquoi nous avons choisi l'équation du 7ème palier pour calculer R, à titre d'exemple.

Cette équation est la suivante :

	t (1)
- 1,55 x densité apparente (2).....	1,220
+ 4,16 x indice Σ	<u>4,561</u>
+ 6,02 x Matière organique.....	<u>1,853</u>
+ 1,20 x Cailloux.....	1,876
- 0,0382 x Profondeur.....	<u>2,945</u>
+ 0,0225 x Hy2.....	<u>2,340</u>
+ 4,43 x Potassium.....	<u>1,990</u>
+ 2,31 (constante)	
= R	

Afin d'avoir une idée de la valeur de cette équation pour une prévision de R, on a porté sur un graphique en ordonnée la valeur de R calculé par cette équation (Rc) et en abscisse la valeur de R observé (Ro) (fig.25). Si la prévision était parfaite, les points représentatifs de tous les prélèvements se trouveraient sur la bissectrice. Nous constatons que presque tous les points sont compris entre 2 droites situées de part et d'autre de cette bissectrice.

-
- (1) Le t de chaque variable indique si, dans cette équation, la valeur calculée de R dépend significativement de cette variable. La valeur de t soulignée de 3 traits est significative à 1%, celles soulignées de 2 traits le sont à 1% et celles soulignées à 1 trait le sont à 5%.
- (2) Rappelons que la plupart des variables, dont R, a subi une transformation; il est donc nécessaire d'utiliser les variables transformées pour calculer R.

La précision de R n'est pas très bonne, pour une prévision de l'enracinement. Elle est meilleure si l'on ne considère pas les horizons organiques (cf. les droites tracées sur le graphique).

D'un point de vue pratique, cependant, l'équation ne peut fournir qu'une idée de l'enracinement futur d'un horizon, ce qui présente un intérêt certain tout de même.

Remarquons qu'aucune équation ne pourrait fournir une prévision parfaite de l'enracinement, car chaque horizon y est considéré comme une entité indépendante du reste du profil (il en était de même pour les droites limites).

b) Equation du 8ème palier de la régression effectuée pour les horizons non organiques, pour l'Epicéa (fig. 26) :

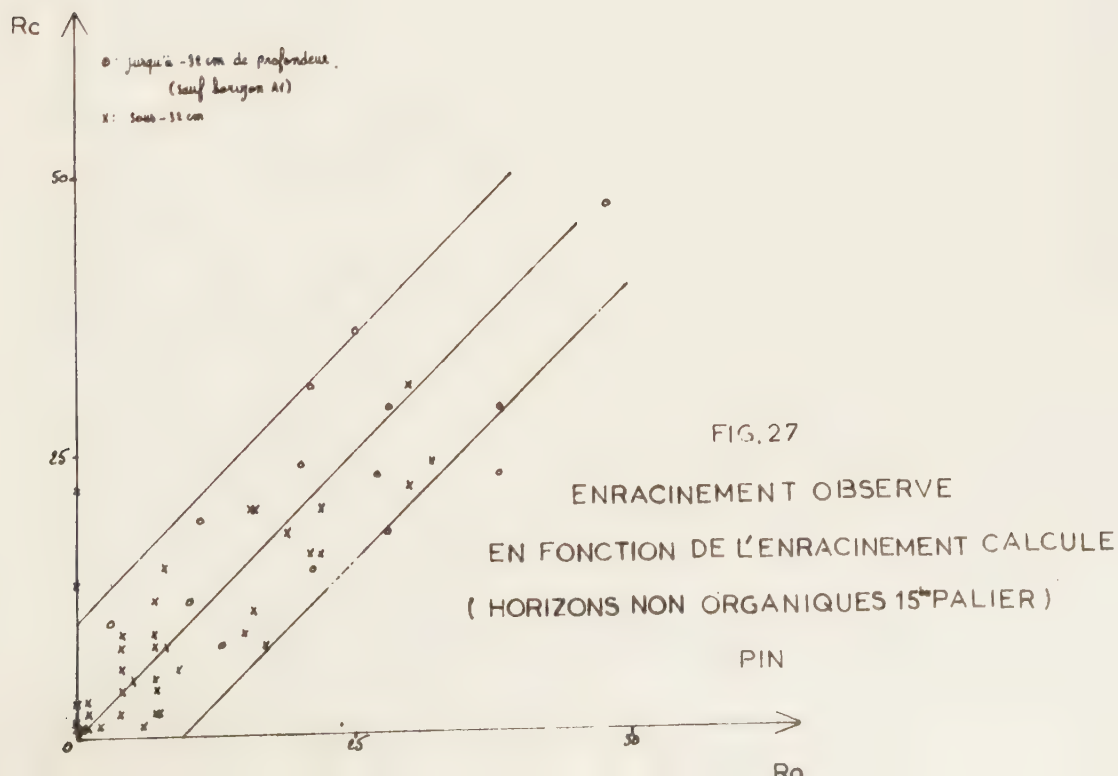
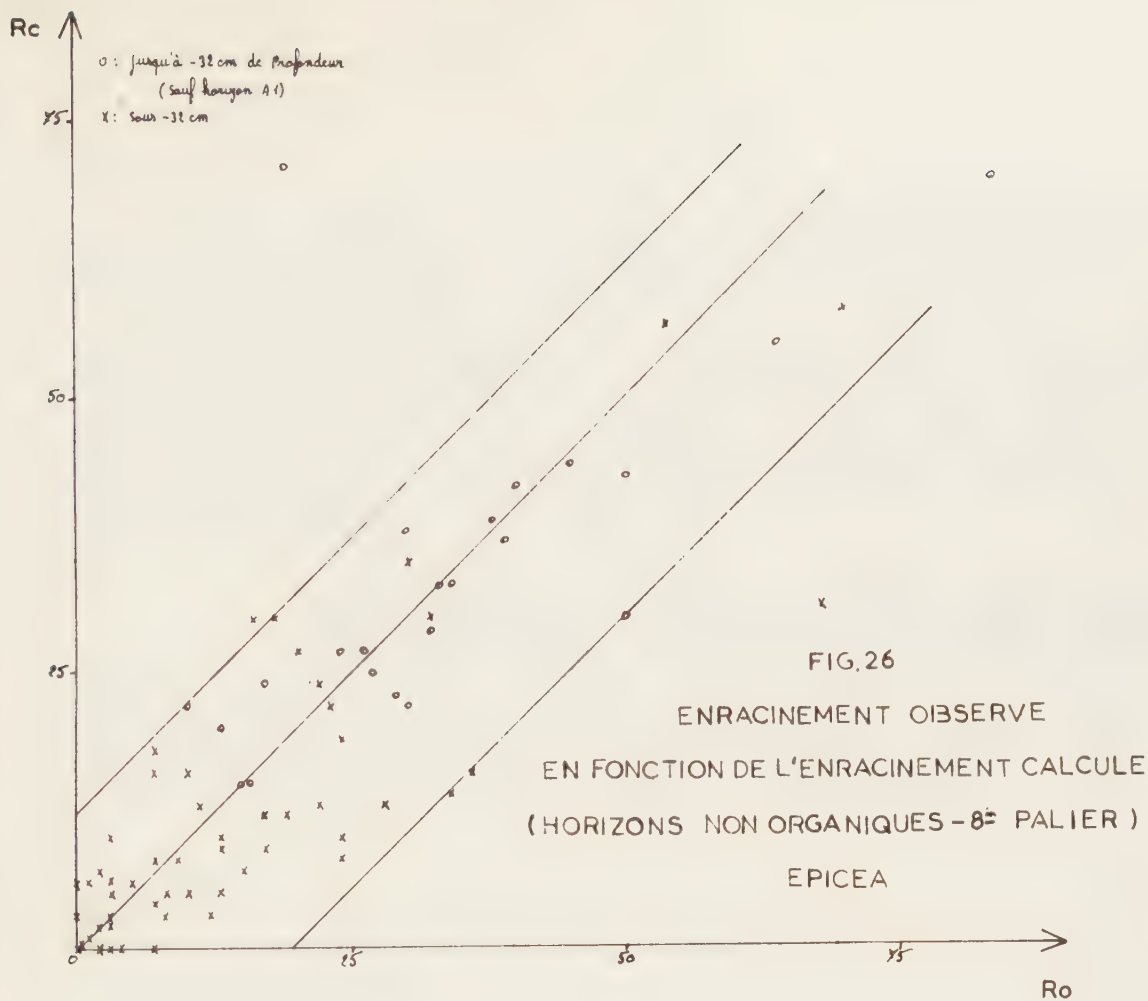
C'est surtout la prévision de R des horizons non organiques qui nous intéresse, car l'enracinement des horizons organiques est toujours élevé, au moins pour l'Epicéa.

Nous avons choisi l'équation du 8ème palier de cette régression : son coefficient de corrélation multiple est de 0,783, il n'augmente que peu ensuite (0,805 au 20ème et dernier palier). Nous examinerons si cette équation est préférable à celle du 7ème palier de la régression effectuée pour l'ensemble des horizons, pour la prévision de R des seuls horizons non organiques.

Cette équation est la suivante :

	t
- 0,0502 x profondeur.....	<u>6,85</u>
- 5,55 x indice Σ	<u>4,96</u>
+ 3,28 x argile.....	<u>3,68</u>
- 1,19 x cailloux.....	1,50
+ 0,600 x A1/T.....	0,92
+ 0,0508 x âge.....	<u>2,08</u>
+ 4,00 x potassium.....	1,79
+ 8,10 x c - f.....	1,78
- 6,23 (constante)	

= R



Les 2 variables qui ont t le plus élevé sont les mêmes que pour l'équation précédente (Σ et profondeur).

Nous avons comparé R calculé par les 2 équations et R réel, pour chacun des prélèvements. Il s'avère que pour les horizons organiques l'équation du 7ème palier de la régression précédente est toujours préférable, ce qui est normal, puisque l'équation du 8ème palier était calculée pour des horizons non organiques seulement. Pour la prévision de R des horizons non organiques, les 2 équations sont, en moyenne, équivalentes; celle du 8ème palier a cependant l'avantage de ne pas nécessiter la mesure de la densité apparente.

c) Equation du 15ème palier de la régression effectuée pour les horizons non organiques, pour le Pin (fig. 27) :

La prévision de R par cette équation nécessite la mesure de 15 variables; on l'a pourtant choisie car son coefficient de corrélation multiple, égal à 0,781, est presque équivalent à celui de l'équation choisie pour l'Épicéa (sans les horizons organiques); il n'augmente guère ensuite (0,787 au 20è et dernier palier). Cette équation est la suivante :

	<u>t</u>
+ 0,00440 x EUC.....	0,27
- 46,8 x phosphore.....	<u>3,13</u>
- 3,29 x potassium.....	1,24
+ 0,0539 x Σ	0,03
+ 14,0 x (c - f).....	1,86
- 0,754 x Hyl.....	<u>3,05</u>
+ 0,731 x Ca/T.....	0,75
+ 24,8 x matière organique.....	<u>2,56</u>
+ 6,04 x densité apparente.....	<u>2,42</u>
+ 0,0454 x Hy2.....	<u>2,60</u>
- 1,21 x pH.....	<u>2,68</u>
- 4,07 x limons.....	<u>2,31</u>
- 0,0433 x profondeur.....	1,70
+ 2,17 x cailloux.....	1,96
- 0,0707 x âge.....	1,33
+ 2,86 (constante)	

= R

La figure 27 montre la précision que l'on peut attendre de cette équation pour une prévision de R.

III - SYNTHÈSE DES DEUX MÉTHODES (GRAPHIQUE ET STATISTIQUE) DE PRÉVISION DE L'ENRACINEMENT -

1) Précision des 2 méthodes :

La comparaison de R_d et de R_c à R_o aboutit au résultat suivant : les équations utilisées à titre d'exemple pour calculer l'enracinement fournissent une meilleure prévision que les droites limites pour environ les $3/4$ des prélèvements.

Ce résultat était prévisible car pour R_c les points représentatifs des divers prélèvements sont répartis de façon à peu près égale de part et d'autre de la bissectrice, alors que pour R_d la très grande majorité de ces points est située au-dessus de celle-ci ($R_d > R_o$).

Cependant, l'écartement des deux droites entre lesquelles se trouvent presque tous les points est assez semblable sur ces graphiques : il y a seulement un certain décalage par rapport à la bissectrice.

Les deux méthodes s'avèrent donc d'une précision comparable, apparemment. Pour comparer les possibilités d'enracinement dans plusieurs sols, on pourra utiliser l'une ou l'autre de ces méthodes, mais toujours la même. L'une (statistique) donne une meilleure idée de l'enracinement réel, l'autre (graphique) indique la densité d'enracinement qui ne sera en général pas dépassée. La méthode statistique a l'inconvénient d'être en général plus longue : elle nécessite la connaissance d'un plus grand nombre de variables et fait intervenir des calculs (dont une transformation préalable de la plupart des variables).

2) Explication des enracinements " aberrants " :

La prévision de l'enracinement de certains horizons s'avère très mauvaise, que ce soit par l'une ou par l'autre méthode. Ces horizons sont représentés sur les graphiques par des points situés loin de la bissectrice.

On obtient apparemment plus de points très aberrants en utilisant la méthode graphique ; en fait, ces points aberrants supplémentaires correspondent à 3 prélèvements qui n'ont pas été utilisés dans la méthode statistique afin de ne pas perturber l'analyse de régression : leur enracinement dépendait visiblement trop de propriétés autres que celles de la terre fine de l'horizon considéré. Pour l'ensemble des points aberrants, on peut faire les constatations suivantes :

- a) Une bonne partie de ces points correspond à des horizons situés avant -32 cm de profondeur : il y a probablement perturbation provoquée par des infiltrations de matière organique (la description des profils le confirme).
- b) Il est logique qu'une teneur en cailloux très élevée dans un horizon (par exemple $> 70\%$) perturbe les corrélations entre l'enracinement et les propriétés de l'horizon : l'enracinement est inférieur à ce que laisseraient prévoir ces propriétés.
- c) Des propriétés que l'on n'a pas chiffrées peuvent modifier l'enracinement ; il s'agit en particulier d'une hétérogénéité affectant la macrostructure : fentes verticales dans un horizon argileux, canaux laissés par les racines d'un peuplement précédent, zones décolorées verticales peu cohérentes d'un horizon Bg, une certaine structure horizontale héritée d'une roche-mère assez peu altérée.
- d) Les deux méthodes utilisées ne prévoient l'enracinement qu'en fonction des propriétés de l'horizon considéré. Or il est logique de penser qu'il dépend aussi en partie des autres horizons du profil, et qu'en particulier un changement assez brusque de propriétés d'un horizon au suivant modifie l'enracinement des parties de ces horizons en contact l'une avec l'autre ; c'est ce que nous appellerons les " effets-contacts ". Il s'agira surtout des variations brusques de résistance à la pénétration (dûe par exemple à l'augmentation du taux d'argile) et de la teneur en cailloux.
- e) L'enracinement peut aussi dépendre de facteurs partiellement ou totalement indépendants du sol : densité de la végétation secondaire, dissymétrie de l'enracinement, race des arbres, leur âge exact.

CONCLUSION DE LA 2ème Partie

Si l'on désire dégager, pour conclure, les propriétés dont dépend le plus d'enracinement, il semble normal de prendre comme critère essentiel les coefficients de corrélation à profondeur et âge constants. En effet, les grandeurs qui apparaissent alors interviennent réellement dans la nature, compte-tenu de l'interférence entre variables. Ces propriétés sont :

- pour les deux essences :

- en premier lieu, la stabilité structurale, particulièrement l'indice Σ (liaison positive avec R),

- le rapport Ca^{++}/T , lié négativement à R, (et Al^{+++}/T , qui lui est plus ou moins complémentaire).

- Pour l'Epicéa : la densité apparente -(liaison négative avec R)

- pour le Pin : le phosphore (liaison négative) et la texture, en particulier les limons (liaison négative).

D'autres liaisons avec l'enracinement apparaissent par les coefficients de corrélation partielle (sur les variables initiales et les composantes principales) mais l'influence réelle de ces variables sur l'enracinement est masquée. Par contre elles pourraient peut-être présenter un grand intérêt dans une action en vue d'améliorer l'enracinement : ainsi en est-il (par exemple) du potassium, lié positivement à R de l'Epicéa.

Lorsqu'on désire prévoir l'enracinement, on retrouve, dans les méthodes utilisées (droites limites ou formules) la plupart des variables dont le coefficient de corrélation avec R à profondeur et âge constants est significatif. Mais, pour qu'une prévision à l'aide des formules soit assez valable, il est souvent nécessaire de faire intervenir des variables supplémentaires.

Pour l'Epicéa, les deux méthodes de prévision mettent en évidence l'importance primordiale des propriétés physiques. Pour le Pin, les variables chimiques ont plus d'importance que pour l'Epicéa, en particulier le phosphore et le pH, dont le t est significatif dans l'équation utilisée à titre d'exemple, et qui interviennent, par leur droite limite, dans la méthode graphique.

Ces deux méthodes de prévision offrent une précision assez médiocre; elles fournissent surtout un ordre de grandeur de R . La précision la meilleure est peut-être obtenue à l'aide des formules, mais la méthode des droites limites présente l'avantage de la simplicité.

3ème Partie

LES ENSEMBLES DE PROFILS

ET

LEUR ENRACINEMENT

CHAPITRE I

LE GROUPEMENT DES PROFILS

Les méthodes statistiques et graphiques nous ont fourni (cf. 2ème partie) des formules et des droites permettant de prévoir dans une certaine mesure l'enracinement d'un horizon; l'on pourrait de cette façon déterminer l'enracinement d'un profil quelconque, horizon par horizon. Mais cette méthode serait fort longue.

Nous avons montré que l'enracinement dépendait en grande partie de certaines propriétés du sol. Ne pourrait-on pas obtenir rapidement une idée, au moins grossière, de l'enracinement, en se fondant sur les facteurs, facilement accessibles, qu'on peut supposer à la base de ces propriétés : les matériaux originels (la " roche-mère ") et la pédogénèse ? Dans l'affirmative, l'on pourrait constituer à l'aide de ces deux facteurs des ensembles de sols; tous les sols d'un même ensemble auraient un même type d'enracinement. Il suffirait alors de pouvoir rattacher un sol quelconque à l'un des ensembles pour obtenir une idée de son enracinement (cela dans le cadre géographique choisi).

Il est nécessaire de vérifier en premier lieu que les propriétés les plus importantes pour l'enracinement sont déterminées directement par la roche-mère ou la pédogénèse. Nous pourrions ensuite effectuer le groupement des sols.

I - PROPRIETES IMPORTANTES -

Le critère essentiel des propriétés du sol les plus importantes pour l'enracinement R est le coefficient de corrélation à profondeur constante avec R. Ces propriétés sont, (cf. 2ème partie) :

1) En premier lieu la stabilité structurale, l'indice Σ en particulier. En effet :

- Σ a un coefficient de corrélation avec R à âge et profondeur constants très significatif (et positif), pour les 2 essences.

- On a pu tracer des droites limites pour les 3 indices de la stabilité structurale.

- La 1ère composante principale (la structure et sa stabilité) a un coefficient de corrélation totale avec R très élevé.

2) La texture, pour le Pin, car :

- Le coefficient de corrélation à profondeur et âge constants des limons avec R est très significatif, celui des argiles est significatif au seuil de 5%. Cette liaison de R avec la texture, pour le Pin, est confirmée par les graphiques par catégorie de profondeur, qui laissent supposer une liaison à profondeur constante de R avec les limons (corrélation négative) et les sables (corrélation positive).

- La composante principale traduisant la texture a un coefficient de corrélation partielle avec R assez élevé.

3) Le calcium, car Ca/T a un coefficient de corrélation à profondeur constante, avec R, très significatif (négatif) pour les deux essences, bien que moins élevé en valeur absolue que celui de Σ .

Les mêmes ensembles de sols doivent évidemment convenir aux deux essences; c'est pourquoi l'on se fondera surtout sur Σ et Ca/T, et moins sur la texture qui n'apparaît très importante que pour le Pin.

D'autres propriétés, dont dépend également l'enracinement, paraissent peut-être avoir une importance moins générale : la densité apparente, l'aluminium, le phosphore, principalement. On pourra cependant examiner de quelle façon elles influent sur l'enracinement des ensembles de sols.

II - LIAISON DE CES PROPRIETES AVEC LA ROCHE-MERE ET LA PEDOGENESE -

1) L'indice Σ :

On a représenté sur un tableau (tableau 5), par catégories, la valeur de Σ des différents sols pour diverses catégories de profondeur. L'indice Σ variant avec la profondeur (en moyenne il diminue), c'est la place relative d'un sol dans chaque catégorie de profondeur qui importe. On se rend compte que très souvent, cette place est à peu près la même, pour un sol, dans toutes les catégories de profondeurs où il est représenté.

On constate ainsi la présence d'ensemble de sols : sols à Σ relatif très élevé (quelle que soit la profondeur), sols à Σ très faible, sols à Σ moyen, etc... Ces divers ensembles de sols correspondent-ils à des types différents de roche-mère ou de sol ?

a) Le type de roche-mère :

La réponse est affirmative : chaque ensemble de sols correspond généralement à un type de roche-mère. Ainsi, les sols formés sur roche-mère très argileuse épaisse (muschelkalk marneux, sinémurien) sont groupés; leur Σ est très faible (sols M1, M3, M7, M8, M9). De même, les sols formés sur grès vosgien (Sa1 à Sa6, D3, D4, D5) sont groupés, ils ont un Σ très élevé. Chaque autre ensemble de sols à Σ voisins correspond aussi à un type commun de roche-mère, à part les sols formés sur roche-mère calcaire dont les Σ sont dispersés; mais ce cas particulier s'explique : les indices de la stabilité structurale dépendent de la quantité, très aléatoire, de petits fragments calcaires traversant le tamis de 2 mm avec la terre fine.

b) Le type de sol :

Il y a un certain groupement suivant le type de sol, car, dans un cadre géographique étroit, à une même roche-mère correspondent souvent des sols de même type ou de type voisin. Mais d'autre part certains sols de même type ont des Σ très différents. Par exemple, des sols sur grès vosgien (Sa2,3,4,6) ainsi que des sols sur alluvions anciennes (M4 et M6) sont du type lessivé à pseudogley; mais, alors que l'indice Σ des premiers est très élevé, celui des seconds est assez faible. Et des sols de type différent ont des Σ très voisins, lorsqu'ils proviennent de la même roche-mère : ainsi les sols formés sur grès vosgien sont de type lessivé à pseudogley, brun oligotrophe, podzolique.

c) Synthèse :

L'indice Σ est donc déterminé en premier lieu par la roche-mère. Cependant le rôle propre de la pédogénèse n'est pas négligeable. Ainsi les sols de SAINT-AVOLD (Sa1 à Sa6) et certains sols de SAINT-DIE (D3,4,5) sont formés sur grès vosgien; dans la plus grande partie des profils Σ de tous ces sols est à peu près identique; mais en profondeur Σ de la plupart des sols de SAINT-AVOLD devient nettement inférieur à Σ des sols de SAINT-DIE, ce qui correspond à une pédogénèse différente : cette baisse relative de Σ coïncide avec l'apparition de la couche hydromorphe profonde des sols lessivés à pseudogley, couche n'existant pas dans les sols de SAINT-DIE (sols bruns oligotrophes et podzoliques).

TABLEAU 5

VARIATIONS DE L'INDICE Σ AVEC LA PROFONDEUR SUIVANT LA STATION

Σ Pro- fondeur (cm)	30-40	40-50	50-55	55-60	60-65	65-70	70-75	75-80	80-85	85-90	90-95	95-100
13-22				M7-D6	M10	M1-M5-A4	M8-M2-C1 A1-M4	S4	S1	S3-A2		D1-D2-D3 Sa5-Sa2-D4 Sa1-D5
23-32			M8	M1	M2-M9-V7	M6-V1-V3	V2-S3-V4	S9-S8-D6 A2-D2	A3-V8-S5	S2	V6-C3-V5	Sa6-S6 - Sa4-Sa3 V9
33-47				M3-M3	M5-A4-S4 A1	M4-S2-S1 S9	A2	V3-D2	C2	D1-D6-Sa5	Sa6-Sa2	Sa1-D5-D3
48-67	M8	D6-M7-M1		M2-M6-M5 M10	A4-M4-S4 S9	V4-V2-A3 V1-S5-A2 A1-V6-S2	D1-S8	V8	Sa6	Sa4 - Sa5	D4-Sa3 Sa1-D3	C3
68-82		M1	M9-M3	M6-M2-A2 Sa2	S1	A3-Sa6 C3	V4-V2-A2 V8	D1-D4-Sa3 Sa1			D5	
> 82	M9-M7	M2	M2-M3-A2	S4-A3-M4	M10-Sa4 A3-D6-M10	A1-M4-M6 Sa6-A1- Sa4-D2	S9-S8 Sa3-D1	Sa1	D5			V5

2) La texture :

Les caractères généraux de la texture d'un sol dépendent évidemment en premier lieu de la roche-mère. Ainsi les sols formés sur roche-mère calcaire du jurassique supérieur sont en général argileux dans tout le profil; les sols formés sur grès vosgien sont à dominante sableuse, etc...

Mais très souvent, la texture d'un sol varie assez fortement avec la profondeur; la pédogénèse peut en être la cause, elle différencie les horizons. La façon dont la texture varie avec la profondeur peut être la même pour les sols issus d'une même roche-mère, mais cela n'est pas forcément le cas. Ainsi sur grès vosgien, les sols bruns oligotrophes ont une teneur en argile à peu près constante dans leur profil, alors que celle des sols lessivés à pseudogley augmente assez nettement en Bg (par définition).

3) Le calcium :

La teneur d'un sol en éléments minéraux, donc en calcium, dépend évidemment de la roche-mère. Mais, par le phénomène du lessivage, la pédogénèse intervient aussi (en fait, il s'agit de la résultante entre le lessivage absolu et la remontée biologique).

Comment les influences de la roche-mère et de la pédogénèse se traduisent-elles sur la teneur effective en calcium et plus spécialement sur le rapport Ca/T des sols étudiés ? Pour s'en rendre compte on a établi, comme pour l'indice Σ , un tableau représentant les valeurs de Ca/T des différents sols par catégorie de profondeur (tableau 6).

a) Le type de roche-mère :

Les sols possédant du calcaire actif dans tout leur profil, ou presque, sont groupés. Il s'agit de sols formés sur jurassique supérieur et sur keuper. La carte géologique indique comme roche-mère, pour les premiers de ces sols, l'oxfordien et le lusitanien (argovien, rauracien, séquanien); ces profils, même ceux formés sur oxfordien, théoriquement marneux, possèdent beaucoup de cailloux calcaires. Rappelons que nous n'avions pu grouper ces sols en prenant Σ comme critère, les tests de stabilité de la structure étant souvent perturbés par la présence de petits fragments calcaires.

TABLEAU 6

VARIATIONS DU RAPPORT Ca^{++}/T AVEC LA PROFONDEUR SUIVANT LA STATION

Profondeur (cm)	Ca^{++}/T	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-100	Calcaire actif
13-22		D1-Sa1-D3 Sa3	D2-D4-D5	D6	S1-S3-A2	M8	Sa2-A1	A4		S4	M4	C1-M5-M10
23-32		Sa4-D6	D2-Sa3	M9-A2 S3-Sa6	S5-A3	S8-S9-S2	M8		M6	M2	M1-S6	V4-V6-V8 C1-C3-V1 V2-V5-V7 V9
33-47		D2-D1-D3 D6 - Sa5	Sa1-D5	Sa2-Sa6	A2	S3-A1-S9	A4		S1-S2		S4-M3 M3-M4	V3-C2-M5
48-67		D6	Sa3-Sa5- Sa6-Sa1- Sa4-D1-D3 D4		A2		A1-S8-A3 M8	S5-S9-A4	M2-M7	S2	S4-M1-M6	V4-V6-V8 C3-M5-V1 V2-M10
68-82		D5-D2	Sa1-Sa3	Sa6-D1-Sa2	D4	A2	M2	A3	S8	S1-M6	M1-M9-M3 M4	V4-V8-C3
> 82		D2-D1-Sa4 Sa3	Sa6-D5-Sa1	Sa2-Sa5			M2-A2	M2-A1-M7 A3	A3-A1	M6-S8	M4-M3-S9 M4-S4	M9-M10-V5

Les sols formés sur grès vosgien ou les produits de démantèlement du grès vosgien sont également groupés; leur rapport Ca/T est faible.

Les sols formés sur les autres types de roche-mère ne sont pas toujours très groupés. Leur place relative peut varier ou non avec la profondeur; par exemple, elle augmente avec la profondeur dans les sols formés sur Terra Fusca (car le calcaire n'y est pas très profond).

b) La pédogénèse :

Il y a un certain groupement suivant le type de sol; mais, comme pour $\sum$, les sols de même type groupés correspondent à une même roche-mère ou à des roche-mères voisines. Comme dans le cas de $\sum$, des sols de même type peuvent avoir des rapports Ca/T très différents, et des sols provenant de roche-mères voisines ont souvent des rapports Ca/T proches, même si leur pédogénèse a été très différente; par exemple, les sols formés sur grès vosgien ont tous un rapport Ca^{++}/T relativement faible, et pourtant ils peuvent appartenir à des types bien différents (sol brun lessivé à pseudogley, sol podzolique, etc...).

Cependant, le rôle de la pédogénèse n'est pas nul. On constate que la répartition du calcium dans un même profil en dépend. Ainsi très souvent à l'horizon A2, correspond un minimum (lessivage du calcium).

On peut pourtant conclure que Ca/T d'un sol est déterminé principalement par la roche-mère.

4) Conclusion :

La pédogénèse, mais surtout la roche-mère, déterminant les principales propriétés dont dépend l'enracinement. Les caractères généraux de ces propriétés dans un profil dépendent de la roche-mère, alors que la pédogénèse modifie quelque peu ces propriétés localement, différenciant ainsi en partie les horizons. Les sols formés sur jurassique supérieur et ceux formés sur Terra Fusca ont des propriétés assez différentes; on pourrait penser que la pédogénèse en est la cause et non la roche-mère, car le bajocien est souvent assez comparable au lusitanien; en fait la plupart des auteurs considèrent la Terra Fusca comme la véritable roche-mère des sols actuels et non le bajocien : il y a une différence de roche-mère et pas seulement de pédogénèse entre ces sols.

Aussi le groupement fondé sur ces propriétés correspond-il dans l'ensemble à un groupement suivant le type de roche-mère. Ceci se vérifie en particulier pour Σ , sauf en ce qui concerne les sols formés sur roche-mère calcaire du jurassique supérieur qu'on n'a pu grouper entre eux et avec ceux formés sur keuper en prenant cet indice comme critère; mais l'examen de la texture et du calcium justifie la formation d'un ensemble pour ces sols.

La roche-mère constituera donc le critère de base pour la formation des ensembles de sols. C'est le faciès qui interviendra : des roche-mères d'aspect et propriétés voisines pourront caractériser le même ensemble, même si elles proviennent d'étages géologiques différents.

La pédogénèse, nettement moins importante que la roche-mère pour le groupement des sols, pourra intervenir éventuellement comme critère de sous-ensembles. De plus, lors de l'étude de chaque ensemble, on décrira la variation de l'enracinement suivant les horizons typiques des sols; certaines différences dans la pédogénèse des sols d'un même ensemble expliqueront peut-être des différences dans leur enracinement.

III - LES ENSEMBLES DE SOLS -

Compte-tenu de ce qui précède, nous nous proposons de considérer les ensembles suivants :

1) Sols formés sur roche-mère argileuse épaisse (muschelkalk, sinémurien) :

Tous ces sols sont fort comparables quant à l'indice Σ (propriété essentielle) et la texture; Σ est très faible, la texture est argileuse en profondeur, limoneuse ou argileuse en surface. Par contre, les valeurs de Ca/T sont dispersées.

Il s'agit de certains sols de la région de MIRECOURT (M1, M3, M7, M8, M9).

2) Sols formés sur limons (limons éoliens recouvrant les marnes de Charmouthien) :

L'indice Σ est assez faible en général. La texture est limoneuse dans la première partie des profils, puis argileuse. Le rapport Ca/T prend des valeurs moyennes.

Ce sont les profils de l'arborétum d'AMANCE.

3) Sols formés sur Terra Fusca (argiles de décalcification et limons) :

L'indice Σ est moyen à assez faible. La texture est équilibrée à limoneuse dans la première partie des profils, puis argileuse.

Ca/T prend des valeurs d'abord moyennes, puis de plus en plus élevées avec la profondeur.

Il s'agit des sols de l'arborétum de la SIVRITE.

4) Sols à calcaire actif (roche-mère : jurassique supérieur et keuper) :

L'indice Σ est variable (pour la raison indiquée auparavant). La texture est en général argileuse, parfois équilibrée en profondeur.

Il s'agit des sols des régions de VERDUN et de COMMERCEY et de certains sols de la région de MIRECOURT (M5 et M10).

5) Sols formés sur roche-mère provenant, au moins en partie, du grès vosgien ;

Il s'agit des sols formés sur grès vosgien en place ou éboulés, ou sur alluvions anciennes composées en grande partie de produits de démantèlement du grès vosgien.

L'indice Σ est en général élevé. La texture est sableuse ou équilibrée, mais il y a toujours au moins 50% de sable. Le rapport Ca/T prend des valeurs faibles à très faibles.

Nous distinguerons les 3 sous-ensembles suivants :

a) Sols formés sur grès vosgien, en stations à forte pente et à une certaine altitude certains sols de la région de SAINT-DIÉ : D3, à D5.

b) Sols formés sur grès vosgien en station plate (plaine). Ces sols diffèrent, en général, de ceux du 1er sous-ensemble par la pédogénèse qui abaisse dans certains horizons l'indice Σ et y modifie un peu la texture.

Il s'agit des sols de SAINT-AVOLD.

c) Sols formés sur alluvions anciennes composées en partie de produits de démantèlement du grès vosgien. Ces sols diffèrent de ceux des 2 premiers sous-ensembles par la texture : nettement plus d'argile (15 à 25 %) et pour un indice Σ , en général, un peu plus faible. Ils diffèrent aussi de ceux du premier sous-ensemble par la pédogénèse.

Il s'agit des stations D1 et D2 (de SAINT-DIE).

Ce groupement n'inclue pas certains des sols étudiés : les stations isolées ne pouvant se rattacher à aucun groupe et celles dont la composition de la roche-mère est très variable dans l'espace (limites entre deux étages géologiques et certaines alluvions); il s'agit des stations S4, S6, D6, M2, M4, M6.

Nous donnerons dans le chapitre II une physionomie de l'enracinement dans chaque ensemble.

CHAPITRE II

L'ENRACINEMENT DANS CHAQUE ENSEMBLE DE SOLS

Comme dans les densités d'enracinement diminuent presque toujours avec la profondeur, c'est surtout leur valeur relative, par rapport à la densité d'enracinement de toutes les stations de la même essence dans la même catégorie de profondeur, qu'il sera intéressant de considérer.

I - SOLS FORMES SUR TERRA FUSCA -

1) Roche-mère et sols :

La Terra Fusca est une roche-mère complexe, formée sur certains affleurements calcaires : calcaire bajocien en forêt de HAYE pour ce qui nous concerne. Le calcaire se trouve à une profondeur variable, 1 m à 1,50 m pour les profils étudiés.

Sur Terra Fusca en place (en l'absence de pente), les sols étudiés sont des sols bruns lessivés ou des sols lessivés, parfois légèrement marmorisés en profondeur (présence de concrétions et d'un léger bariolage). L'horizon A1 a environ 8 cm d'épaisseur, plus des infiltrations. L'horizon A2 se poursuit jusqu'à -35 cm, B jusqu'à -80 cm. La texture est équilibrée à limoneuse en A1 et A2, puis argileuse.

La densité apparente prend des valeurs moyennes dans l'ensemble, compte-tenu de la profondeur. Elle augmente de A1 à A2 (où elle est voisine de 1,18) et à B (1,30). Elle augmente en B (par exemple jusqu'à 1,44, parfois plus). Au delà de -75 cm, elle diminue, devenant égale à 1,25 ou même moins, ce qui est très faible pour cette profondeur.

L'indice Is augmente fortement de A1 (0,10 ou 0,15) à A2 (0,45 à 0,80) et à B (1,50 à 1,95). Il varie peu avec la profondeur dans l'horizon B; il peut même diminuer en profondeur. Ces valeurs de Is peuvent être considérées, compte-tenu de la profondeur, comme moyennes en A2, assez défavorables en B, principalement dans la partie supérieure de cet horizon. Les 2 autres indices de la stabilité structurale ont une variation assez comparable à celle de Is.

En présence d'une pente il y a formation de sols bruns mésotrophes. Ce type de sol, représenté par une seule de nos stations, ne sera pas étudié ici.

2) Enracinement :

Dans tous les ensembles de stations, l'enracinement de l'horizon A1 est sous dépendance de la végétation secondaire. Cet horizon est pratiquement toujours bien enraciné sous les peuplements d'Epicéas, où la végétation secondaire est en général très réduite. Cette végétation secondaire est en général beaucoup plus dense sous les Pins, ce qui se traduit souvent par un mauvais enracinement de cette essence dans l'horizon A1. Dans l'étude des différents ensembles de stations, nous n'insisterons pas sur l'enracinement de cet horizon, très particulier.

Dans les sols formés sur Terra Fusca, l'enracinement de l'Epicéa est élevé en A1 ($R > 100$). Il diminue assez fortement de A1 à A2 (environ 40) et de A2 à la partie supérieure de B (environ 8), puis reste à peu près constant en B sur 30 cm.

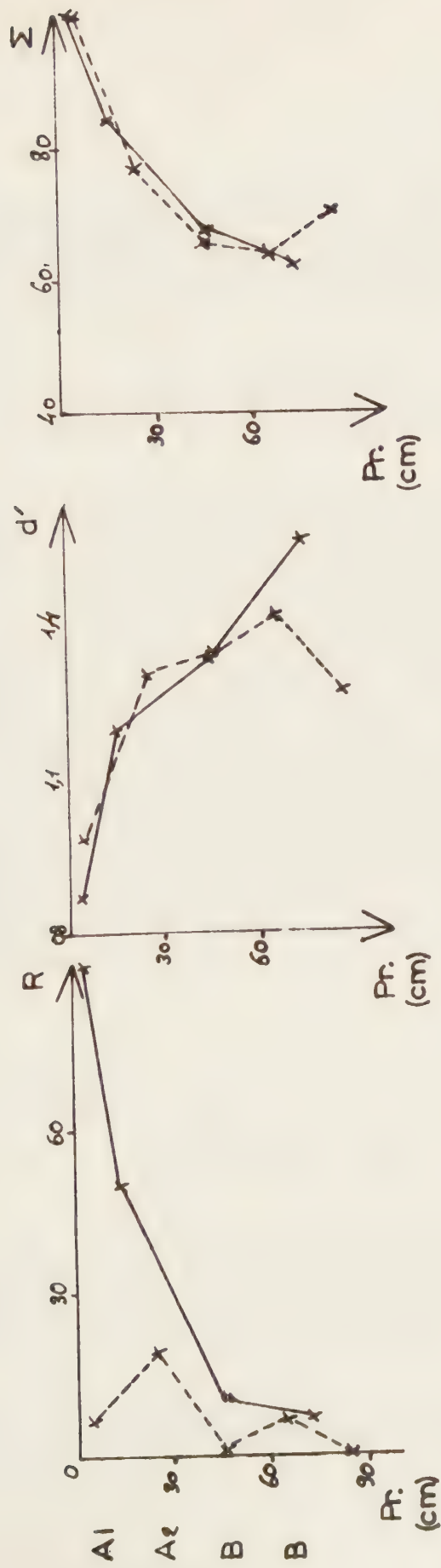
L'enracinement du Pin est faible dans l'horizon A1 (R compris entre 7 et 15), il augmente un peu de A1 à A2 ($R = 20$), diminue assez fortement de A2 au début de B (environ 3), varie peu dans l'horizon B (où il augmente parfois un peu). Il est nettement inférieur à celui de l'Epicéa dans pratiquement tous les horizons. Vers -80 cm environ, l'enracinement des deux essences devient nul.

En valeur relative, l'on peut noter ainsi l'enracinement dans les divers horizons, pour une station type (1) :

Horizons	A1	A2	B début	B fin
R Epicéa	1	4	6	4 à 5
R Pin	6	3	6	5

Tableau 7

-
- (1) 7 classes d'enracinement relatif (c'est à dire par rapport aux autres sols de la même essence dans la même catégorie de profondeur) :
 1 = très bon, 2 = bon, 3 = assez bon, 4 = moyen, 5 = assez mauvais,
 6 = mauvais, 7 = très mauvais.



ENRACINEMENT ET
 PROPRIETES DU SOL
 EN FONCTION DE
 LA PROFONDEUR

— EPICEA (S1)
 --- PIN (S9)

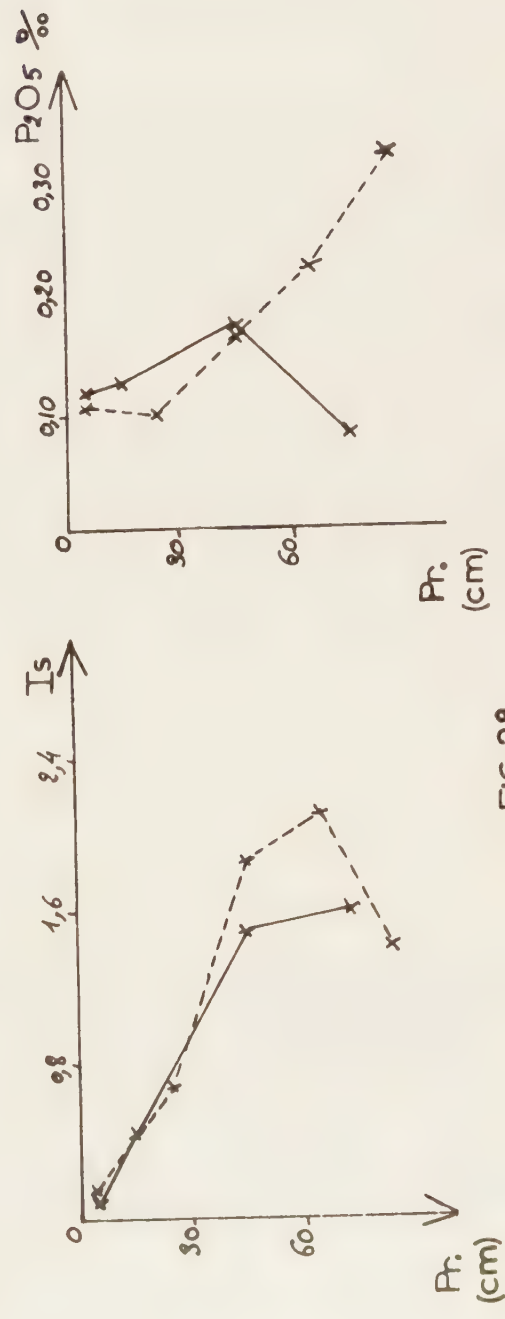


FIG. 28

En valeur relative, à part dans l'horizon A1 pour les stations d'Epicéa, l'enracinement est donc en moyenne assez mauvais pour les deux essences. C'est dans l'horizon A2 qu'il est le meilleur (infiltrations de matière organique), surtout pour le pin (compensation du mauvais enracinement de A1 ?).

En B, compte-tenu de la profondeur, R est inférieur à la moyenne (horizon fortement enrichi en argile et à propriétés physiques assez défavorables); il est le plus faible dans la partie supérieure de B.

Si l'on compare horizon par horizon, l'enracinement réel à l'enracinement maximum déduit des différentes droites limites, l'on s'aperçoit que, pour tout le profil et pour les deux essences, c'est l'indice I_s qui est la variable en général la plus limitante (le phosphore apparaît aussi pour le Pin). Il y a effectivement parallélisme entre les variations de R et de la stabilité structurale (principalement I_s); I_s devrait permettre un enracinement moyen en A2, assez faible en B, surtout dans la partie supérieure de cet horizon, ce qui est bien le cas. Si l'on désire obtenir rapidement une idée de l'enracinement d'un sol sur Terra Fusca, il sera donc intéressant d'effectuer le test I_s . Sa mesure fournit une bonne prévision de R de l'horizon A2; ainsi dans la station-type, pour l'Epicéa, un $I_s = 0,56$ en A2 entraîne un enracinement limite de 44; or R réel est égal à 38. Pour l'horizon B, R réel est assez nettement inférieur à R que laisse prévoir la mesure de I_s ; cela est particulièrement net au début de B (malgré une valeur pourtant défavorable de I_s), ce qui laisse supposer l'existence d'un effet-contact dû à l'augmentation assez brusque de la résistance à la pénétration. Pour le Pin on améliorera parfois cette prévision, en effectuant l'analyse du phosphore.

II - SOLS A CALCAIRE ACTIF -

1) Roche-mère et types de sols :

Il s'agit de différents étages du jurassique supérieur (Stations V.I. à V.9, de la région de VERDUN, et C1 à C3, de celle de COMMERCEY), ainsi que du keuper (Stations M5 et M10, de la région de MIRECOURT). Les stations étudiées sont situées sur roche-mère en place (assez proche de la surface du sol) ou sur éboulis.

Les sols sont peu profonds. La texture est en général argileuse dans tout le profil, parfois équilibrée en profondeur.

Sur jurassique supérieur, ce sont en général des sols bruns calcaires, parfois des sols bruns calcimorphes, mais les cailloux calcaires ne sont jamais très éloignés de la surface. Ces cailloux sont presque toujours abondants, souvent même dès la surface. L'horizon A1 a environ 10 cm d'épaisseur (parfois 20 cm). (B) a une épaisseur très variable (il se poursuit jusqu'à -20 à -30 cm), de même que l'horizon (B)/C.

Sur keuper se trouvent des sols calcaires vertisoliques. L'horizon A1, caractéristique, a de 12 à 15 cm d'épaisseur. Après un horizon A1/C intermédiaire, l'horizon C, bariolé, marneux, à structure en partie lamellaire et à nombreux petits cailloux, débute vers -25 cm.

La densité apparente, sur jurassique supérieur, n'a pu souvent être mesurée en raison de l'abondance des cailloux. Elle est assez variable suivant la station, souvent proche de la moyenne, pour chaque profondeur. Ainsi en (B), par exemple à -25 ou -30 cm, elle prend des valeurs comprises entre 1,16 et 1,38. Sur keuper, la densité apparente augmente jusqu'à -55 cm environ ($d' = 1,40$), puis elle diminue un peu.

Sur jurassique supérieur, les valeurs de I_s dans chaque catégorie de profondeur sont relativement dispersées. Cependant I_s est souvent assez faible; parmi les valeurs les plus fréquentes, citons $I_s = 0,50$ à -30 cm, $I_s = 0,60$ à -50 cm. Sur keuper I_s est variable, souvent moyen ($1,00$ à -50 cm).

Comme on l'a constaté au chapitre I, les valeurs de Σ sont dispersées dans chaque catégorie de profondeur, dans ces sols. Sur jurassique supérieur, les valeurs de Σ les plus fréquentes sont moyennes pour la profondeur considérée: par exemple à -55 cm, Σ est souvent proche de 70. Sur keuper, Σ est souvent faible pour la profondeur ($\Sigma = 58$ à -55 cm), sauf en profondeur, où il est moyen.

2) Enracinement :

En général, pour les deux essences, R diminue nettement de A1 à (B) (ou C pour les sols calcaires vertisoliques); là il diminue assez peu (et même parfois augmente), sur une profondeur variable. Il devient nul quand les cailloux sont trop nombreux.

Dans l'horizon A1, R de l'Epicéa est pratiquement toujours supérieur à celui du Pin. Au-dessous il en est souvent de même, mais dans certaines stations les deux essences ont des enracinements assez semblables.

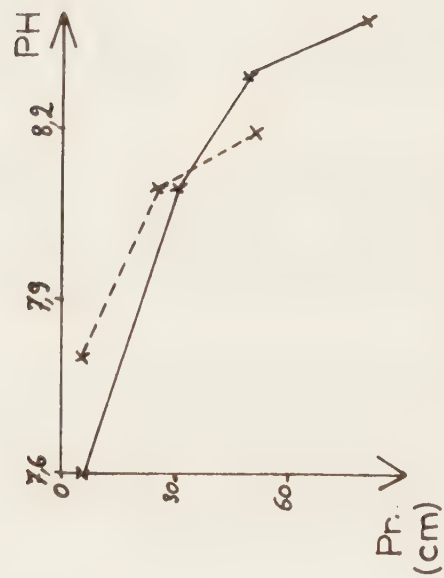
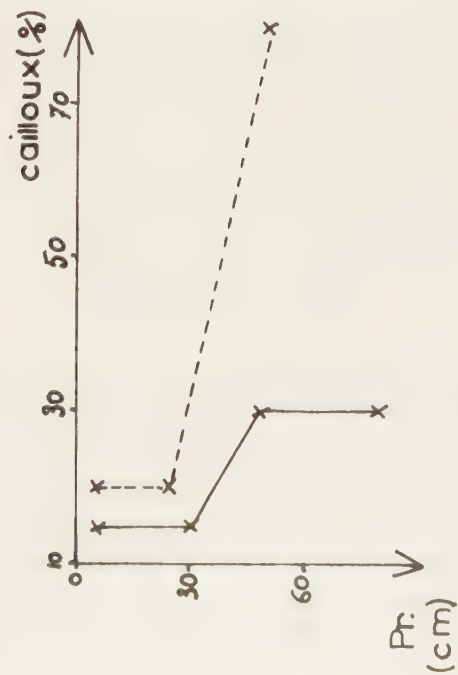
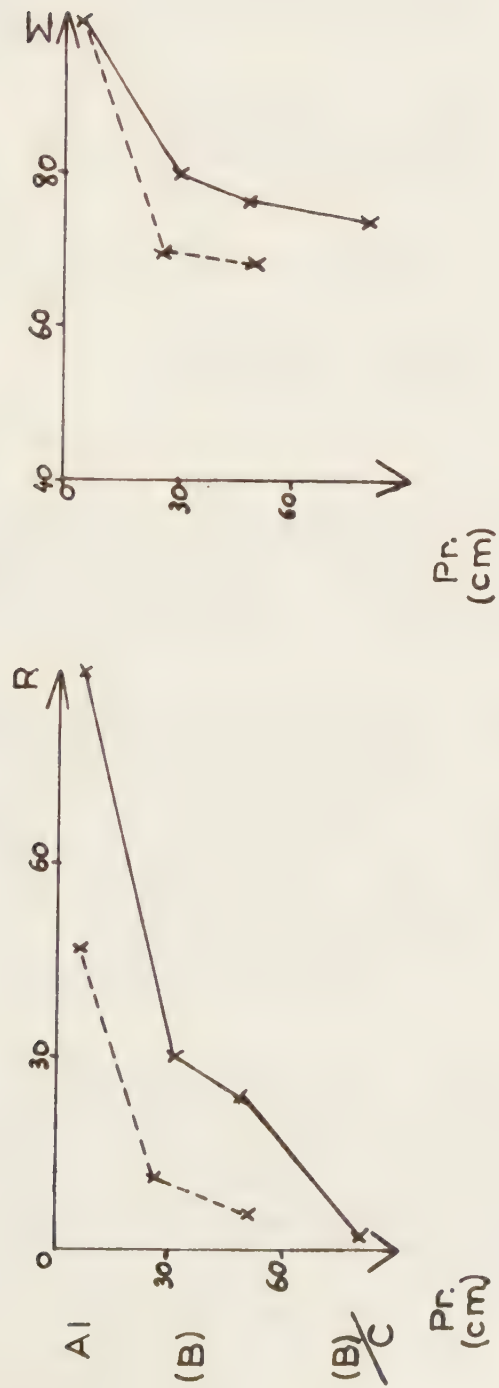


FIG. 29

- SOLS A CALCAIRE ACTIF -

ENRACINEMENT ET
PROPRIETES DU SOL
EN FONCTION DE
LA PROFONDEUR

— EPICEA (V8)
--- PIN (V2)

En général, l'enracinement n'est pas homogène dans chaque horizon, et il est très variable d'une station à l'autre et d'un horizon au suivant; il est de très bon à très mauvais, suivant le nombre et la répartition des cailloux. Pour les stations où les cailloux ne sont pas trop nombreux et où leur pourcentage ne varie pas trop brusquement, R est moyen dans tout le profil; cela est en accord avec la valeur des propriétés physiques de la terre fine. Mais bien souvent la présence des cailloux et les effets-contacts qui s'ensuivent perturbent l'enracinement :

- quand il y a de très nombreux cailloux dans un horizon, son enracinement est faible. Il en est de même lorsque l'horizon contient un pourcentage de cailloux moins important, mais qui diminue en-dessous.
- juste avant un fort pourcentage de cailloux (> 70%), ou entre ces cailloux lorsqu'ils sont répartis d'une façon hétérogène, R est bon ou très bon. En-dessous, c'est à dire au début de la couche où il y a beaucoup de cailloux, R devient mauvais; puis il est un peu meilleur.

Cela est valable pour les sols bruns calcaires et bruns calcimorphes. Les sols calcaires vertisoliques ont des cailloux moins nombreux et plus petits. Mais la roche-mère (marneuse) plus ou moins désagrégée, formée de plaquettes assez dures, est proche de la surface, et son action sur l'enracinement est comparable à celle des cailloux calcaires.

La variable la plus limitante (droites limites) pour l'enracinement du Pin sylvestre sur tous ces sols est le pH, ce qui confirme le caractère calcifuge de cette espèce; le pH apparaît un peu plus limitant en général que les propriétés physiques, mais guère plus : il conduit à des enracinements moyens, compte-tenu de la profondeur. La mesure du pH fournit une bonne prévision de R lorsque les cailloux ne sont pas trop abondants dans ou à proximité de l'horizon; par exemple (dans la station V5) un pH de 8,5, qui entraîne un R limite de 10, correspond à un R réel de 8. Sinon, suivant la répartition des cailloux, l'enracinement peut être nettement supérieur ou inférieur à ce que laisserait prévoir le pH.

Pour l'Epicéa, les varibales limitantes sont le plus souvent la profondeur ou l'indice Σ . Les droites limites correspondantes fournissent une assez bonne prévision de R lorsque les cailloux ne sont pas trop abondants; l'enracinement est alors limité à une valeur moyenne; par exemple, dans la station C1, à -32 cm, un Σ de 83,5, entraînant un R limite de 48, correspond à un R réel de 33. Sinon l'enracinement est modifié, par les cailloux, de la même façon que pour le Pin. L'enracinement

de l'Epicéa est pratiquement toujours nul dans ces stations au plus à partir de -80 cm. On n'a pas pu tracer de droite limite pour le pH dans le cas de l'Epicéa; signalons néanmoins que R n'est jamais supérieur à 33 lorsque le pH est égal ou supérieur à 8,0, pour cette essence.

III - SOLS FORMES SUR LIMONS -

1) Roche-mère et types de sols :

Il s'agit des limons éoliens de la forêt d'AMANCE (stations A1 à A4), recouvrant les marnes feuilletées à *Amaltheus margaritatus* du Charmouthien. Les marnes influent probablement sur les propriétés de la partie inférieure des profils.

Les sols sont des pseudogleys ou des sols bruns lessivés à pseudogley. L'horizon A1 a de 5 à 11 cm d'épaisseur, plus des infiltrations en A2. Les horizons A2 ou A2g se poursuivent jusqu'à -40 cm. En Bg, la marmorisation est de plus en plus nette vers la partie inférieure du profil (B'g). La texture, d'abord équilibrée à limoneuse, devient argileuse en Bg.

La densité apparente prend des valeurs moyennes dans l'ensemble, mais assez variables suivant la station et l'horizon. Les valeurs les plus courantes, approximativement, sont 0,90 dans l'horizon A1, 1,17 en A2g, 1,35 dans la partie supérieure de Bg, puis 1,40 à 1,54. Les stations d'Epicéa, en particulier la station A2, ont en général des valeurs de ρ_a plus faibles que celles de Pin en Bg, B'g, et Cg. Ainsi la densité apparente, pour la station A2, dans ces horizons, est très faible (1,14 à -45 cm, 1,27 à -58 cm, 1,33 à -75 cm).

L'indice Is, à part dans l'horizon A1, prend des valeurs assez défavorables : il est assez fort à fort en général. Ainsi Is est souvent voisin de 0,75 en A2g, 1,80 en Bg. La partie inférieure du profil de la station A2 prend les valeurs de Is très élevées : 2,72 à -75 cm, 3,68 à -100 cm; cela est en opposition avec les valeurs correspondantes de la densité apparente qui sont, rappelons-le, très faibles. En A2g et au début de l'horizon Bg, Is des stations de Pin est assez nettement supérieur à Is des stations d'Epicéa.

La variation des deux autres indices de stabilité structurale est assez comparable à celle de Is; ils ont des valeurs souvent assez faibles (stabilité structurale assez mauvaise) pour la profondeur considérée. Ainsi Σ , proche de 75 dans l'horizon A2g, est souvent voisin de 65 en Bg et B'g.

2) Enracinement

Pour l'Epicéa, la station A2 pouvant constituer un cas assez particulier (race), on se fonde surtout sur la station A1.

La densité d'enracinement diminue assez nettement de l'horizon A1 à l'horizon A2g (R proche de 40 vers -20cm, comme pour les sols sur Terra Fusca), moyennement de A2g au début de Bg (ou A2g/Bg) (environ 25, ce qui est nettement supérieur à R des sols sur Terra Fusca); elle diminue peu avec la profondeur en Bg, jusqu'aux environs de -80cm. Elle devient très faible vers -100 cm.

Pour le Pin on se fonde surtout sur la station A4, l'enracinement de la station A3 paraissant assez anormalement faible.

La densité d'enracinement diminue nettement de l'horizon A1 (R voisin de 50) à A2g (R=13). Elle diminue peu de A2g à Bg, ainsi que dans l'horizon Bg, jusqu'aux environs de -60 cm.

L'enracinement de l'Epicéa est, dans chaque horizon, supérieur à celui du Pin. La différence est assez faible dans l'horizon A1.

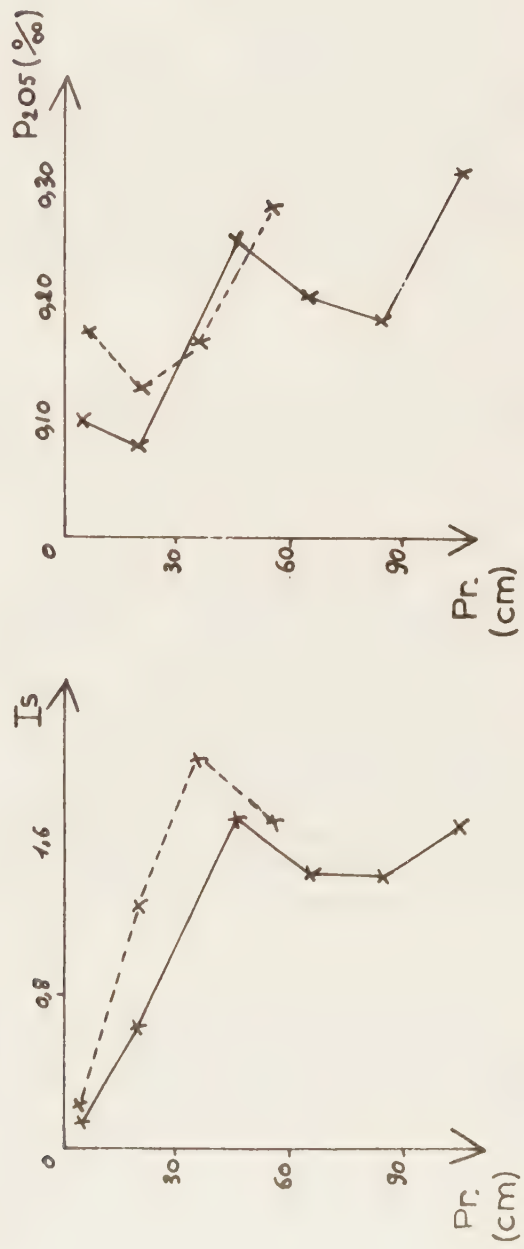
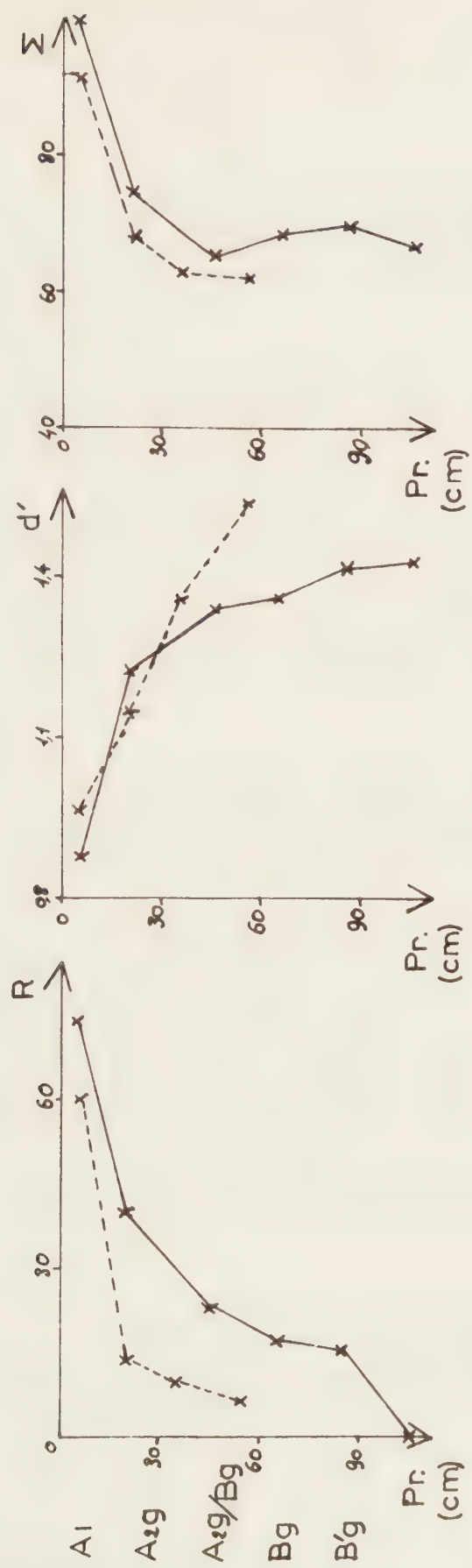
En valeur relative, l'enracinement de la station type peut être noté ainsi (1) :

Horizons	A1	A2 ou A2g	Début Bg ou A2g/Bg	Bg	B'g
R Epicéa	5	4	3	3	1
R Pin	2	6	6	4	

Tableau 8

Ainsi, en valeur relative, à part pour l'horizon A1, l'enracinement de l'Epicéa est moyen (dans l'horizon A2) ou supérieur à la moyenne (sous l'horizon A2); celui du Pin est moyen (dans Bg) ou inférieur à la moyenne.

(1) Cf. Note page 65



ENRACINEMENT ET
PROPRIETES DU SOL
EN FONCTION DE
LA PROFONDEUR

— EPICEA (A1)
- - - PIN (A4)

FIG. 30
-SOLS FORMES SUR LIMONS-

Il convient de noter particulièrement l'enracinement relatif assez élevé (principalement pour l'Epicéa) dans les horizons Bg et B'g; en fait les racines y sont localisées dans les zones décolorées peu cohérentes, dont la résistance à la pénétration est bien inférieure à celle du reste de l'horizon.

Par examen des droites limites, on s'aperçoit que les variables qui limitent le plus d'enracinement sont, pour le Pin, Is et le phosphore, et pour l'Epicéa, Is dans la partie supérieure des profils, Is ou la profondeur dans leur partie inférieure. La profondeur est limitante dans les horizons où l'enracinement est localisé dans les zones décolorées. Quant à Is, il ne prend pas de valeurs trop défavorables à l'enracinement de l'Epicéa qu'il limite, au pire, à une valeur moyenne; par contre il entraîne pour le Pin en A2g et au début de Bg un enracinement faible. Mais rappelons que, dans ces horizons, Is est moins élevé dans les stations d'Epicéa que dans celles de Pin; les stations choisies n'étant pas entièrement semblables de ce point de vue pour les deux essences, on ne peut tirer de conclusion définitive quant à leur enracinement comparé sur cette rochemère.

A l'aide des variables citées on aboutit en général à une très bonne prévision de l'enracinement, pour les deux essences. Par exemple, au début de l'horizon Bg de la station A4, R est égal à 9 alors que Is, égal à 2,04, entraîne un enracinement limite de 10.

L'enracinement de la station A2 est excellent sur toute la profondeur du profil, jusqu'à -100 cm; il est même " aberrant " (supérieur à ce que laissent prévoir les droites limites) pour certains prélèvements, horizon A2 en particulier; notons à ce sujet la présence, dans cet horizon, de poches de matière organique. Mais il est bon de préciser le fait suivant: les graines à l'origine des arbres de cette station A2 venaient d'un bouquet d'Epicéa ayant résisté à une sécheresse particulièrement importante, en 1893, en Haute-Saône; il est donc possible que l'enracinement particulièrement bon de cette station soit une conséquence du facteur " race ": c'est peut-être un enracinement de ce type, dense et profond, qui a permis aux Epicéas de résister à la sécheresse de 1893 (en prélevant l'eau en profondeur).

Compte-tenu de cette constatation ainsi que du fait que les Epicéas, dans les deux stations sur limons, ne constituent que des petits bouquets, il est nécessaire de ne considérer qu'avec une certaine prudence leur bon enracinement.

IV - SOLS FORMES SUR ROCHE-MERE ARGILEUSE EPAISSE -

1) Roche-mère et types de sols :

Nous avons regroupé dans cet ensemble les sols des différentes stations de la région de MIRECOURT, situées sur muschelkalk argileux (stations M1, M3, M7, M8) et de la station située sur sinémurien argileux (station M9).

Ces roches-mères ont une texture très fine (environ 50% d'argile, 30% de limons fins). Leur structure est souvent partiellement horizontale (aplatie ou en plaquettes). Elles contiennent différentes couleurs en mélange : gris-verdâtre, souvent lie de vin, rouille; souvent ces couleurs sont réparties en couches horizontales plus ou moins épaisses. Il est possible que dans certaines stations il y ait présence, en surface, d'un matériau d'origine différente, plus limoneux.

Les sols se présentent comme des sols bruns lessivés marmorisés ou des pseudogleys. Les premières traces d'hydromorphie apparaissent très près de la surface, souvent vers -10 cm. L'horizon A1, d'épaisseur variable, se poursuit en général par des infiltrations en A2g. L'horizon Bg, très argileux, débute souvent vers -40 cm; il a une structure prismatique (ou polyédrique); mais ces prismes sont composés, dans certaines stations, de petites plaquettes horizontales, caractère sans doute hérité de la roche-mère. La texture est argileuse en profondeur, limoneuse ou argileuse en surface. Les sols proprement dits sont souvent peu profonds, la roche-mère peu altérée (texture, structure, couleur) apparaissant parfois dès -40 cm.

Pour les sols formés sur muschelkalk, la densité apparente est élevée dans tout le profil (sauf parfois en A1). Voisine de 1,42 vers -25 cm, en A2g, elle devient proche de 1,45 en Bg à -50 cm, puis atteint 1,59 à -80 cm. Dans la roche-mère plus ou moins altérée, elle peut être très forte : par exemple 1,77. Par contre, la densité apparente du sol formé sur sinémurien est assez faible : 1,14 en A2g, au maximum 1,45 (en Bg à -70 cm).

Pour tous les sols de cet ensemble, l'indice Is est en général fort à très fort dans tout le profil (sauf parfois en A1). Ainsi en A2g, Is est presque toujours supérieur à 1,20 à -25 cm; en Bg il dépasse presque partout 2,0 et peut atteindre 3,50. En Cg il atteint des valeurs considérables : 5,0 ou même 10,0. Les deux autres indices de la stabilité structurale prennent des valeurs très faibles, correspondant bien à celles de Is :

vers -25 cm, Kp est voisin de 3,0 et Σ de 60; en Bg Kp est compris entre 1,0 et 2,0 et Σ est proche de 50. En Cg, Kp est inférieur à 1,0 et descend jusqu'à 0,2, et Σ , inférieur à 40, atteint parfois 20.

Les propriétés physiques de ces sols sont donc en général très défavorables.

2) Enracinement : (profil - type)

Pour l'Epicéa la densité d'enracinement diminue fortement de A1 à A2g (en A1/A2g, R est voisin de 65; dans la partie inférieure de A2g, il est proche de 20) et de A2g à Bg. L'enracinement de l'horizon Bg dépend de son évolution par rapport à la roche-mère; les propriétés physiques de la roche-mère sont très défavorables; en général elle est proche de la surface, et Bg en a hérité de nombreux caractères; alors R est très faible (R = 2 ou 3 vers -60 cm). Parfois (station M1), la roche-mère peu altérée est plus profonde: l'enracinement, dans Bg, est alors non négligeable (R = 12 à cette même profondeur).

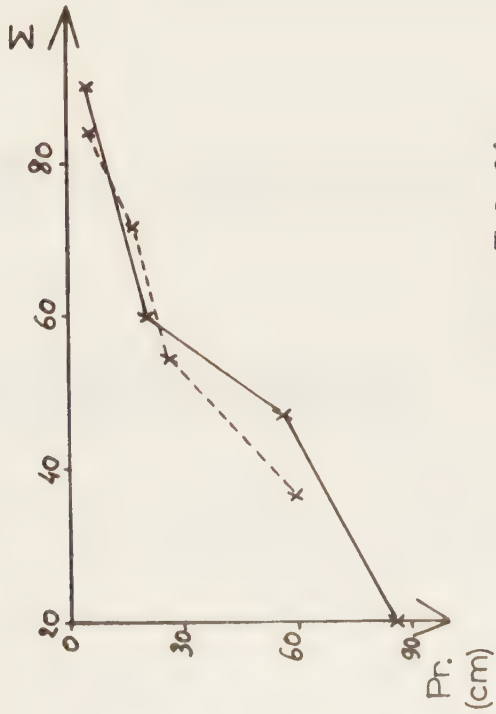
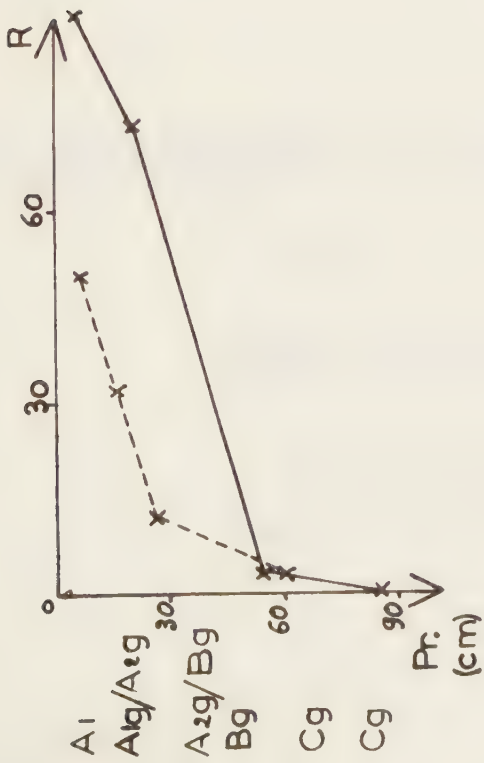
L'enracinement du Pin est assez important en A1 (R proche de 50) et dans les infiltrations de matière organique; ailleurs, il est faible (au maximum 12 à -25 cm, 5 à -60 cm).

En valeur relative, l'enracinement de la station type est le suivant (2) :

Horizons	A1	A1/A2g	Bg	Cg
R Epicéa (1)	1	1	7	7
R Pin	3	3	5	6

Tableau 9

-
- (1) Dans la station choisie comme station-type pour l'Epicéa, la roche-mère est assez proche de la surface. Dans la station M1, où la roche-mère est plus profonde, l'enracinement, dans Bg est meilleur : 5 au lieu de 7.
- (2) cf. note page 65



ENRACINEMENT ET
PROPRIETES DU SOL
EN FONCTION DE
LA PROFONDEUR

— EPICEA (M 7)
--- PIN (M 8)

FIG. 31

SOLS MERE ARGILEUSE EPAISSE

Ainsi pour les deux essences, seuls les horizons contenant de la matière organique ont un enracinement supérieur à la moyenne : horizon A1, et horizon A2g à infiltrations de matière organique. Cela se traduit, surtout pour l'Epicéa, par un enracinement presque uniquement situé dans les horizons de surface (sauf lorsque la roche-mère est assez profonde).

L'examen des droites limites montre que c'est la stabilité structurale en général, et plus particulièrement l'indice Σ , qui constitue le facteur limitant de l'enracinement pour les stations situées sur ces roches-mères. Σ , en général très faible, entraîne un très mauvais enracinement dans les horizons non organiques.

La mesure de Σ permet une bonne prévision de l'enracinement, sauf pour la couche superficielle. Dans les 20 premiers centimètres de sol, (à part pour 1 station, celle située sur sinémurien), l'enracinement est " aberrant ", c'est à dire, assez nettement supérieur à ce que laisse prévoir Σ ; il s'agit de l'horizon A1 et de l'horizon situé sous A1 mais contenant des infiltrations de matière organique; les propriétés particulières de la matière organique en constituent probablement la cause première; le bon enracinement que permet la matière organique dans les 20 premiers centimètres a sans doute été encore accru par le fait que, en profondeur, les propriétés du sol conduisent en général à un enracinement faible (effet de compensation ?). Un léger effet-contact se produit d'ailleurs pour la couche située sous ces horizons contenant de la matière organique : l'enracinement y est un peu inférieur à ce que laisserait prévoir la valeur de Σ .

V - SOLS FORMES SUR ROCHE-MERE PROVENANT AU MOINS EN PARTIE DU GRES VOSGIEN -

Cet ensemble de sols peut se diviser en 3 sous-ensembles.

A) SOLS FORMES SUR GRES VOSGIEN EN STATIONS A FORTE PENTE ET A UNE CERTAIN ALTITUDE :

1) Types de sols :

Nous n'avons étudié sur ces stations que des peuplements de Pin.

Il s'agit de sols bruns oligotrophes et de sols podzoliques de la région de SAINT-DIE (stations D3 à D5). Leur texture est sableuse dans tout le profil. Les sols bruns oligotrophes ont un horizon A1 de 10 cm d'épaisseur; leur horizon (B) est relativement épais; il est mélangé en profondeur (à partir de -60 cm en moyenne) à du grès en voie de désagrégation.

Le sol podzolique, sous un A1 de 10 cm d'épaisseur, a un horizon A2 épais de 30 cm. Sous A2, l'horizon B Fe se poursuit jusqu'à -90 cm. Dessous se trouve un mélange de roche-mère partiellement désagrégée et de cailloux roulés. Dans l'ensemble du profil il y a d'ailleurs une assez forte proportion de morceaux de grès et de cailloux roulés, répartis de façon très hétérogène. La podzolisation n'est pas très poussée. Le sol d'une des stations (D6) était plus évolué; mais, comme il représente un cas assez particulier, nous ne l'incluons pas dans l'examen général de l'enracinement et des propriétés physiques des sols de cet ensemble.

La densité apparente prend en général des valeurs moyennes à assez faibles pour la profondeur considérée. Elle est par exemple proche de 1,15 à -15 cm ((B) ou A2), 1,30 à -40 cm ((B) ou B Fe), 1,45 à -75 cm ((B)/C ou B Fe).

L'indice Is est, dans tout le profil, très faible (à faible) : il est par exemple voisin de 0,19 à -20 cm ((B) ou A2), 0,24 à -40 cm ((B) ou B Fe), 0,50 à -70 cm ((B) /C ou B Fe). Les deux autres indices de la stabilité structurale prennent des valeurs correspondant parfaitement à celles de Is; ainsi $\sum$ est très élevé : > 95 à -40 cm, > 75 à l'extrémité inférieure du profil.

Les valeurs de ces propriétés physiques sont donc relativement indépendantes de l'horizon pédogénétique, du moins lorsque la podzolisation n'est pas trop accentuée.

2) Enracinement :

Sous l'horizon A1, à enracinement variable, les racines sont dispersées de façon assez homogène jusqu'au bas des profils, compte-tenu de la répartition des cailloux : il y a peu de variation, en valeur absolue, avec la profondeur (jusqu'à par exemple - 80 cm). Ainsi dans l'une des stations (D3), R passe de 21 (à -15 cm, horizon (B)) à 32 (à -45 cm, horizon (B)) et à 30 (à - 65 cm, horizon (B)/C).

En valeur relative, l'enracinement du profil-type est le suivant:

Horizons	A1	(B)(ou A2) début	(E) ou B Fe suite	(B)/C ou BFe
Enracinement (1)	(variable)	1 (ou 2)	2	2

Tableau 10

La densité d'enracinement étant, contrairement à la majorité des sols étudiés, peu affectée par la profondeur, l'enracinement relatif est moyen dans les couches de surface et ensuite fort ou même très fort. Les meilleurs enracinements de Pin, de toutes les stations étudiées, se trouvent dans ce sous-ensemble; cela est bien en accord avec les valeurs que prennent les propriétés physiques.

La variable la plus limitante est la densité apparente, dans la plupart des cas, sinon le phosphore; en réalité l'enracinement n'est guère limité en général, si on le compare à celui des autres ensembles de sol. La mesure de ces deux variables permet une bonne prévision de l'enracinement.

Lorsque les cailloux sont nombreux mais répartis de façon hétérogène dans un horizon, il se produit un effet-contact : les racines sont plus nombreuses que prévu aux emplacements sans cailloux.

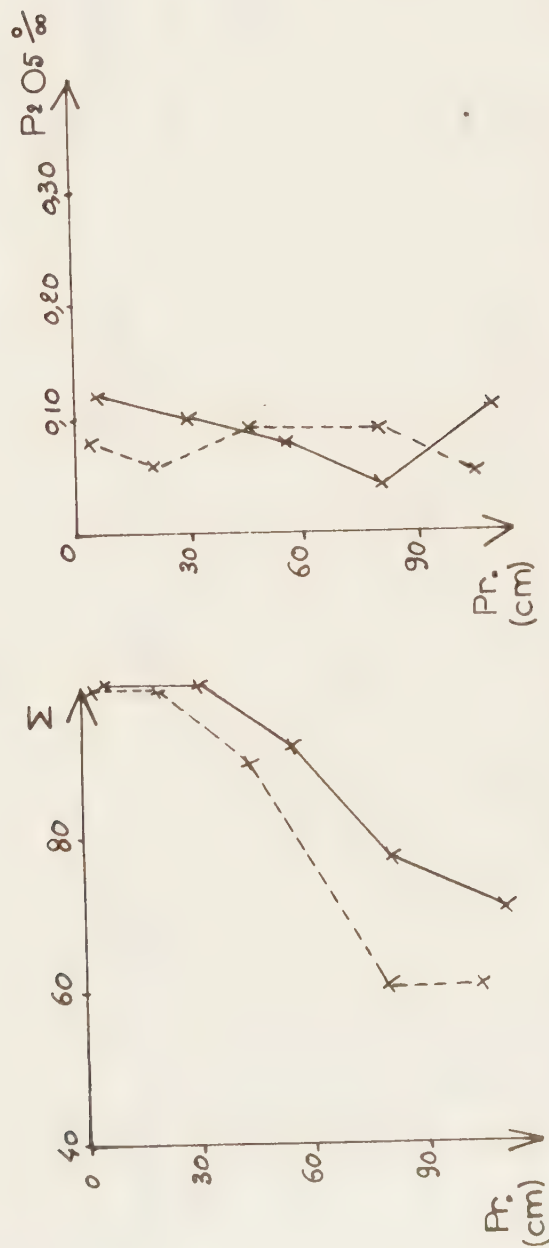
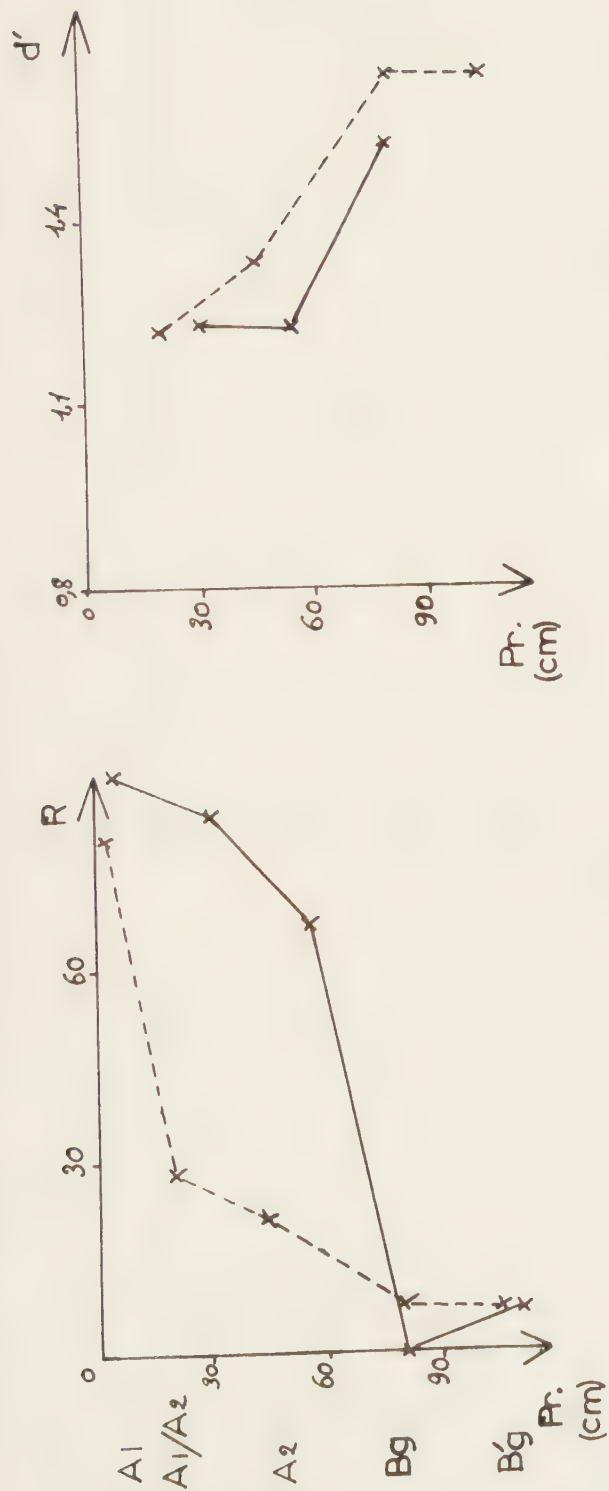
Les propriétés physiques et l'enracinement des sols à podzolisation plus poussée paraissent nettement plus défavorables. Nous y reviendrons ultérieurement.

B) SOLS FORMES SUR GRES VOSGIEN EN STATION PLATE (plaine) :

1) Types de sols :

Il s'agit des sols de la région de SAINT-AVOLD (stations Sa1 à Sa6). Certaines des stations étudiées portent un peuplement de Pin, d'autres, un peuplement d'Epicéa.

(1) cf. note page 65

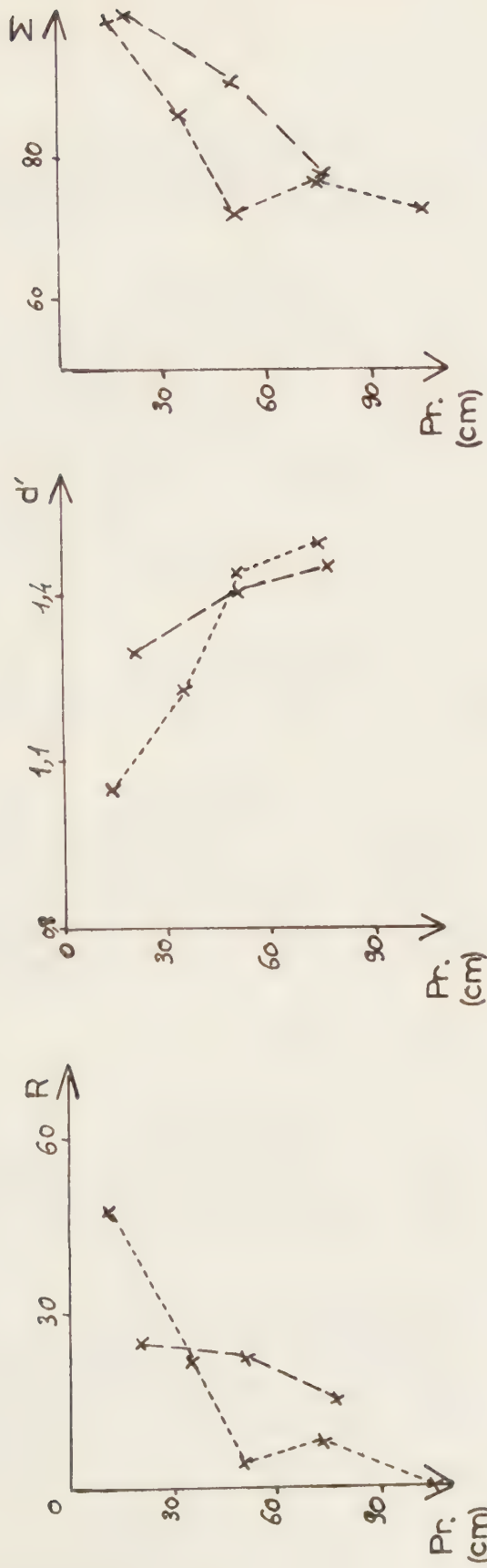


ENRACINEMENT ET
PROPRIETES DU SOL
EN FONCTION DE
LA PROFONDEUR

— EPICEA (Sa3)
--- PIN (Sa2)

FIG. 32 - SOLS FORMES SUR GRES VOSGIEN-1-

station plate, en plaine



ENRACINEMENT ET PROPRIETES

DU SOL EN FONCTION DE

LA PROFONDEUR

--- STATION EN PENTE

PIN (D4)

----- ALLUVIONS ANCIENNES

ISSUES DU GRES

PIN (D1)

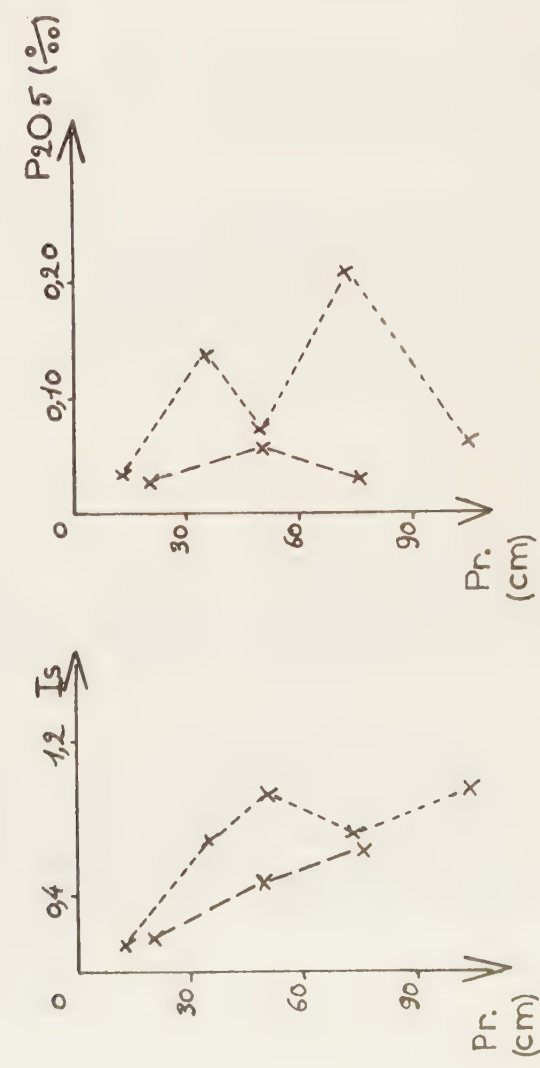


FIG.33 - SOLS FORMES SUR GRES VOSGIEN - 2 -

Presque tous ces sols sont des sols lessivés à pseudogley ou bruns lessivés à pseudogley; l'un est un sol brun oligotrophe. La texture est en général sableuse, parfois équilibrée mais voisine d'une texture sableuse.

Dans ces sols lessivés, et bruns lessivés, à pseudogley, l'horizon A1 (souvent un moder) a environ 10 cm d'épaisseur. Après un horizon intermédiaire (de -10 à -25 cm), se trouve A2 ou A2g, jusqu'à -65 cm; l'enracinement s'arrête souvent brutalement à ce niveau. L'ensemble de ces horizons (avant -65 cm) est très peu résistant à la pénétration. De -65 à -90 cm environ, se trouve l'horizon Bg, beaucoup plus résistant à la pénétration, et débutant souvent par une couche très dure, formée de très nombreuses concrétions. Vers -90 cm, débute l'horizon B'g, de couleur rose ou rouge, comprenant de nombreuses traînées blanches bordées de rouille; les quelques racines de cet horizon sont présentes uniquement dans ces traînées blanches.

La densité apparente prend des valeurs assez variables, suivant la station et la profondeur; en profondeur elle devient très forte, surtout dans l'horizon B'g; elle est par exemple proche de 1,68 à -90 cm.

L'indice Is est très faible dans la plus grande partie du profil. En profondeur (parfois en Bg, souvent en B'g) il peut devenir moyen ou même fort: ainsi il peut atteindre, ou même dépasser, 2,50 à -100 cm (horizon B'g). Les deux autres indices de la stabilité structurale ont une variation assez identique: ainsi Σ , fort ou très fort jusqu'à -65 cm, peut devenir assez faible ou moyen en Bg et B'g (par exemple, dans la station Sa2, Σ = 60 à -80 cm).

2) Enracinement :

L'enracinement de l'Epicéa, très fort en A1, diminue jusqu'à -65 cm, tout en restant élevé pour chaque profondeur (horizons A1 et A2). Celui du Pin, variable en A1, est réparti de façon assez homogène en A2 et A2g: par exemple, dans l'une des stations (Sa2), R, égal à 28 à -20 cm, est encore de 21 à -45 cm (horizon A2).

L'enracinement en Bg, pour les deux essences, est conditionné par la présence, fréquente, de la couche concrétionnée située dans la partie supérieure de cet horizon: cette couche arrête brutalement la plus grande partie de l'enracinement; R est alors très faible ou nul en Bg. Même en l'absence de cette couche, l'enracinement n'est jamais bien fort en Bg.

Que la couche concrétionnée existe ou non, on re trouve en général en B'g, dans les zones décolorées à moindre résistance à la pénétration, un certain enracinement, faible en valeur absolue, mais qui peut être important compte-tenu de la profondeur (par exemple R = 7 à -110 cm). Jusqu'à -65 cm (début de Bg), l'enracinement de l'Epicéa est en général supérieur à celui du Pin.

En valeur relative, on peut noter ainsi l'enracinement des stations type (1) :

Horizons	A1	A1/A2	A2	A2	Bg	B'g
R Fin	variable	4	3		4	3
R Epicéa	1		1	1	7	1

Tableau 11

Pour les deux essences, jusqu'à -65 cm, l'enracinement est donc en général moyen ou supérieur à la moyenne.

C'est dans ce sous-ensemble que l'on trouve les peuplements d'Epicéa les mieux enracinés, parmi toutes les stations étudiées (avec la station A2, particulière).

Les variables les plus limitantes sont, suivant le prélèvement, la densité apparente ou la profondeur pour l'Epicéa, la densité apparente ou le phosphore pour le Pin; cependant, la densité apparente ne prenant jamais en A2 de valeurs très défavorables, cet horizon permet un bon développement de l'enracinement. Leur mesure permet en général une assez bonne prévision de l'enracinement. Il faut cependant tenir compte des effets-contacts : la variation brusque de résistance à la pénétration entre A2 et Bg (et en particulier la présence de la couche concrétionnée au début de Bg) conduit souvent, en Bg, à un enracinement plus faible que ne le laissent prévoir les propriétés du sol, et parfois, dans la partie inférieure de l'horizon A2, à un enracinement supérieur à ce que laissent prévoir ces propriétés.

(1) cf. notre page 65

C) SOLS FORMES SUR ALLUVIONS ANCIENNES COMPOSEES
EN PARTIE DE PRODUITS DE DEMANTELEMENT DU GRES
VOSGIEN :

1) Types de sols :

Il s'agit des stations D1 et D2 de la région de SAINT-DIE.
 Sur les stations étudiées ne se trouvent que des peuplements de Pin.

Ce sont des sols bruns lessivés à pseudogley. Leur texture est équilibrée, avec environ 50% de sables, en général.

L'horizon A1, de 10 cm d'épaisseur, est intermédiaire entre un mull et un moder. Après un horizon intermédiaire, A2 ou A2g se poursuit jusqu'à -40 cm. L'horizon Bg, bariolé, est beaucoup plus résistant à la pénétration que les horizons précédents; il se termine vers -65 cm. L'horizon B'g comprend des surfaces blanches (bordées de rouille) alors que le fond est de couleur rose.

La densité apparente prend des valeurs souvent très variables suivant la station et la profondeur. A partir de -50 cm (en Bg), elle est moyenne pour la profondeur considérée : par exemple $d' = 1,45$ à -75 cm.

La structure est assez stable dans tout le profil (par exemple vers -35 cm, en A2, $I_s = 0,70$ et $\Sigma = 80$).

2) Enracinement :

L'enracinement est variable en A1, élevé en A2 (voisin de 40 à -15 cm) où il diminue ou non avec la profondeur. Il diminue assez nettement de A2 à Bg. En B'g se trouve un certain nombre de racines, mais uniquement dans les parties décolorées (par exemple R = 9 à -75 cm).

En valeur relative, l'enracinement du profil-type est le suivant (1) :

Horizons	A1	A2 1ère partie	A2(ouA2g) 2è partie	Bg	B'g
Enracinement	(variable)	1	2	6	4

Tableau 12

(1) cf. note page 65

L'enracinement est donc assez bon en moyenne. Il est fort ou très fort en A2, faible en Bg, et en B'g la présence de zones décolorées peu résistantes à la pénétration permettent un certain enracinement, non négligeable compte-tenu de la profondeur.

La variable la plus limitante est l'indice Is pour la grande majorité des prélèvements, le phosphore pour les autres; ces variables ne sont pourtant en général pas très défavorables, permettant un enracinement supérieur à la moyenne. Dans l'ensemble, la mesure de ces deux variables conduit à une assez bonne prévision de l'enracinement. Il faut cependant tenir compte d'un effet-contact : en raison d'une assez brusque augmentation de la résistance à la pénétration, l'enracinement de la partie inférieure de A2g est supérieur, et celui de Bg est inférieur, à ce que laissent prévoir les propriétés du sol.

D) SYNTHÈSE POUR L'ENSEMBLE DES SOLS FORMES SUR ROCHE-MÈRE PROVENANT, AU MOINS EN PARTIE, DU GRÈS VOSGIEN :

Cette synthèse concerne surtout l'enracinement du Pin, l'Epicéa n'étant représenté que dans l'un des 3 sous-ensembles.

- Les caractères généraux communs à l'enracinement dans les 3 sous-ensembles sont pour la plupart indépendants des types de sols rencontrés, assez variés.

- L'enracinement de chaque profil est en général supérieur à l'enracinement moyen. Dans cet ensemble se trouvent les sols nettement les mieux enracinés de tous les sols étudiés; pour le Pin ces stations se trouvent sur grès en pente et à une certaine altitude (SAINT-DIE); pour l'Epicéa, il s'agit évidemment du grès en station plate (SAINT-AVOLD), seul sous-ensemble où il est représenté.

- Sous l'horizon A1 et jusqu'à une certaine profondeur, dans la mesure où la résistance à la pénétration n'augmente pas brusquement, l'enracinement des deux essences semble en général peu affecté par la profondeur, contrairement à ce que l'on remarque pour la plupart des autres sols.

- Dans les sols les plus sableux, c'est à dire ceux des deux premiers sous-ensembles, le facteur limitant principal (qui servira à la prévision de l'enracinement) est la densité apparente, pour les deux essences; la stabilité structurale de ces sols est très bonne. Pour le 3ème

sous-ensemble (alluvions anciennes), c'est l'indice Is; la stabilité structurale y est assez bonne. Pour le Pin, dans les 3 sous-ensembles, le phosphore est le facteur limitant secondaire.

- La pédogénèse joue cependant un certain rôle dans l'enracinement par le lessivage et l'hydromorphie :

- dans les sols lessivés, une assez brusque augmentation de la résistance à la pénétration au début de l'horizon B ou Bg provoque un effet-contact : plus de racines que prévu dans la partie inférieure de A2 ou A2g, moins de racines que prévu en B ou Bg.

- par hydromorphie il y a parfois formation d'une mince couche concrétionnée, très dure, faisant obstacle au passage des racines.

- il y a un certain nombre de racines, en quantité souvent non négligeable compte-tenu de la profondeur, dans les zones décolorées de l'horizon Bg ou B'g des sols à pseudogleys.

- On remarque, sur la figure 32, que l'enracinement de la station-type d'Epicéa est nettement supérieur, jusqu'à une certaine profondeur, à celui de la station-type de Pin. Il faut cependant être prudent dans l'interprétation, car les densités apparentes (facteur limitant) correspondantes sont plus favorables pour la station d'Epicéa.

CONCLUSION DE LA 3ème Partie

Comme l'on pouvait s'y attendre, dans chacun des ensembles de sols constitués précédemment les enracinements ont un certain nombre de caractéristiques communes. Nous pouvons les synthétiser ainsi, dans un but de comparaison :

1) Sols formés sur grès vosgien :

L'enracinement des deux essences y est le meilleur, (de très loin pour le Pin) parmi tous les sols étudiés, probablement grâce à la très bonne stabilité structurale. Dans ces conditions le facteur limitant le plus important, dans la plupart des cas, est constitué par la densité apparente, qui n'est pas susceptible, seule d'y limiter beaucoup l'enracinement.

Cela est valable pour les deux essences. L'Epicéa n'est représenté que dans l'un des trois sous-ensembles (sur grès vosgien en plaine); son enracinement y est nettement supérieur, en valeur absolue, à celui du Pin.

L'obstacle majeur à l'enracinement est constitué par la couche concrétionnée, se trouvant à la partie supérieure de l'horizon Bg sur grès vosgien en plaine; mais elle est relativement profonde (-65 cm).

2) Sols formés sur limons (AMANCE)

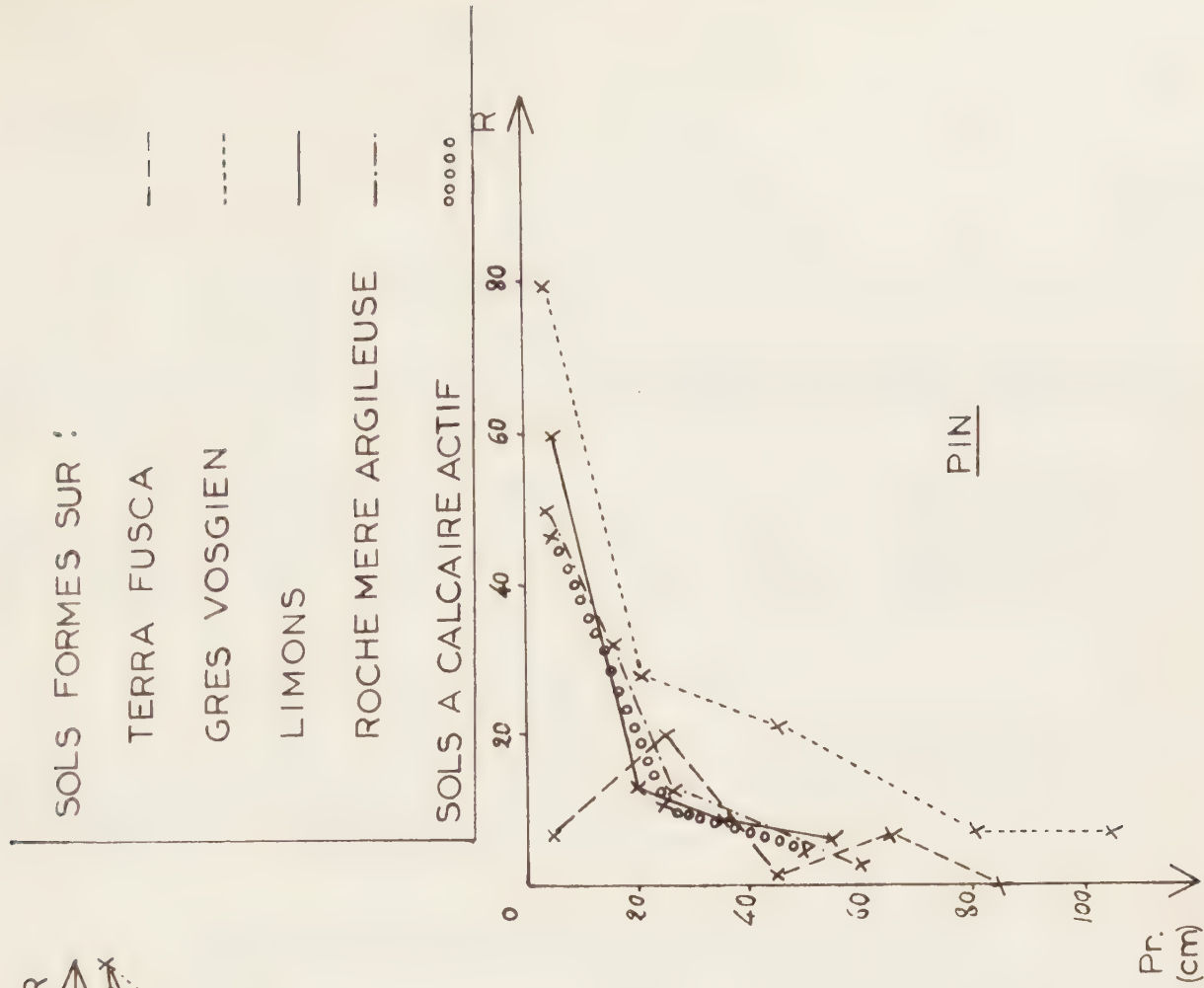
Les deux essences s'y comportent très différemment. Malgré une hydromorphie poussée, l'Epicéa s'y enracine assez fortement sur une relativement grande profondeur : son enracinement est le meilleur après celui des sols formés sur grès vosgien. Par contre, le Pin s'y enracine assez mal, malgré la présence d'un nombre non négligeable de racines en profondeur (horizon Bg); on peut classer son enracinement en avant-dernière position, juste avant celui des sols formés sur roche-mère argileuse épaisse. Il est cependant nécessaire de préciser que les peuplements et les sols ne sont pas absolument comparables pour les deux essences.

La stabilité structurale, par l'intermédiaire de l'indice Is, y est le facteur limitant principal de l'enracinement.



FIG. 34

ENRACINEMENT DES DIFFERENTS
ENSEMBLES DE SOLS EN
FONCTION DE LA PROFONDEUR
(STATIONS - TYPES)



3) Sols à calcaire actif :

Ces sols ont une potentialité moyenne d'enracinement pour les deux essences, dans la mesure où la roche-mère est suffisamment altérée; ils sont, de toute façon, souvent assez peu profonds.

Cet enracinement moyen est à relier à une structure à stabilité en général moyenne ou assez bonne; on peut l'affirmer même pour le Pin, bien que le Ph constitue pour lui le facteur limitant principal : mais il est moins limitant que ne le serait une mauvaise stabilité structurale.

4) Sols formés sur Terra Fusca :

Les racines des deux espèces prospectent le sol d'une manière assez convenable jusqu'à -35 cm (horizon A2), mais plutôt mal dans l'horizon B. La stabilité structurale constitue le facteur limitant de l'enracinement, par l'intermédiaire de l'indice I_s .

5) Sols formés sur roche-mère argileuse épaisse :

L'enracinement y est en général superficiel : bon jusqu'à -20 cm, faible ensuite dans tout le reste du profil. La structure très instable en est probablement la cause; l'indice Σ , avec des valeurs très faibles, constitue le facteur limitant de l'enracinement, qui peut être considéré comme le moins bon parmi tous les ensembles de sols étudiés.

Dans chaque ensemble de stations, l'enracinement de l'Epicéa est supérieur à celui du Pin dans la plus grande partie du profil. En profondeur, les enracinements des deux essences sont souvent proches l'un de l'autre.

CONCLUSIONS GENERALES

1 - LIAISONS ENTRE LES PROPRIETES DU SOL ET L'ENRACINEMENT -

Au cours de ce travail, nous avons effectué une étude de l'enracinement de l'Epicéa et du Pin sylvestre :

- en traçant les droites limites de cet enrachinement en fonction de diverses variables,
- en examinant divers types de corrélations le liant aux propriétés du sol,
- en indiquant sa valeur et les facteurs dont il dépend dans un certain nombre d'ensembles de sols.

Chacune de ces opérations a permis de faire ressortir l'importance, plus ou moins grande, pour l'enracinement, de certaines propriétés du sol.

Il nous est possible maintenant de dresser un bilan de la liaison de ces propriétés avec l'enracinement.

1) Propriétés importantes pour les deux essences :

(les plus importantes sont citées en premier lieu)

Ce sont principalement des propriétés physiques.

a) La stabilité structurale :

Elle apparait d'une manière générale comme la propriété la plus importante.

Il a été possible de tracer des droites limites de l'enracinement en fonction de chacun des trois indices de la stabilité structurale (méthode HENIN), pour les deux essences. Les droites limites concernant

I_s (indice d'instabilité structurale), $\log 10 K_p$ (K_p = indice de " perméabilité "), et Σ (indice résultant d'une combinaison de I_s et K_p) sont parmi les plus importantes pour l'Epicéa, et celles concernant I_s et Σ le sont pour le Pin. Chaque valeur de ces indices limite l'enracinement du Pin à un niveau inférieur à celui de l'Epicéa. Ainsi la densité d'enracinement R ne pourra éventuellement atteindre 30 que si, pour l'Epicéa, I_s est $\leq 1,13$, $\log 10 K_p \geq 1,58$ et $\Sigma > 65$, et si pour le Pin I_s est $< 0,60$ et $\Sigma > 91$.

Il y a presque toujours une bonne correspondance entre la stabilité structurale et l'enracinement de chacun des ensembles de sols étudiés, pour les deux essences; par exemple sur grès vosgien, où la structure est en général stable ou très stable, les deux essences sont bien enracinées; dans les sols bruns lessivés marmorisés ou les pseudogleys formés sur roche-mère argileuse épaisse, où elle est très instable dans presque tout le profil, les enracinements sont en général très superficiels.

Dans les sols où la stabilité structurale n'est pas particulièrement élevée, ce qui se produit en général dans les sols à texture autre que sableuse, la stabilité structurale constitue le plus souvent le facteur limitant principal. Très souvent les trois indices apparaissent tous presque aussi limitants dans un sol donné; cependant l'un d'eux peut s'avérer un peu plus limitant; il s'agit de :

- I_s (indice d'instabilité structurale) :
 - pour les deux essences sur Terra Fusca (R moyen en A2, assez faible ensuite) et sur limons (R assez bon pour l'Epicéa, faible pour le Pin),
 - pour le Pin sur alluvions anciennes provenant du grès vosgien (R assez bon).
- Σ :
 - pour les deux essences sur roche-mère argileuse épaisse (enracinement superficiel),
 - pour l'Epicéa dans les sols à calcaire actif (R moyen).

La composante principale représentant la structure et sa stabilité a un coefficient de corrélation partielle avec R significatif (et positif) pour l'Epicéa; ce coefficient indique une liaison bien réelle.

Σ a un coefficient de corrélation à profondeur et âge constants significatif pour les deux essences.

Le coefficient de corrélation totale des trois indices avec R est significatif.

b) La densité apparente (d') :

Les droites limites de l'enracinement en fonction de la densité apparente d' sont également parmi les plus importantes pour les deux essences. Elles sont presque identiques pour des valeurs de d' supérieures à 1,23; quand d' est inférieur à cette valeur, R de l'Epicéa ne semble pas limité par la densité apparente. R ne pourra éventuellement atteindre 30 que si d' est $< 1,36$ pour l'Epicéa et $< 1,32$ pour le Pin.

La densité apparente a un moins large éventail de variations, dans chaque catégorie de profondeurs, que la stabilité structurale; elle dépend plus de la profondeur que celle-ci. Aussi permet-elle moins de différencier les divers ensembles de sols; ainsi souvent les densités apparentes sont-elles variables, ou oscillent-elles autour de la moyenne. Cependant sur grès vosgien en altitude (où se trouvent les meilleurs enracinements pour le Pin), la densité apparente prend souvent des valeurs assez faibles, alors que dans les sols formés sur roche-mère argileuse épaisse (mal enracinés) elle est souvent très élevée (sur muschelkalk, mais non sur sinémurien).

La densité apparente constitue le facteur limitant principal de R dans les sols à structure stable ou très stable, ce qui est en général le cas des sols à texture sableuse : il s'agit des sols formés sur grès vosgien; l'enracinement de ces sols est presque toujours profond et assez dense.

La densité apparente apparaît, avec un coefficient négatif, dans la composante principale, à coefficient de corrélation partielle avec R de l'Epicéa significatif, qui exprime la structure et sa stabilité.

Son coefficient de corrélation avec R à profondeur et âge constants est significatif pour l'Epicéa, mais non pour le Pin, alors que son coefficient de corrélation totale avec R est significatif pour les deux essences.

Sa liaison réelle avec R apparaît donc moins forte que celle de la stabilité structurale, au moins pour le Pin.

c) La texture :

Il a été possible de tracer pour les sables (liaison positive), les limons et l'argile (liaisons négatives) une droite limite de l'enracinement du Pin; cela n'a pas été possible pour l'Epicéa. Ces droites limites ne constituent cependant le facteur limitant principal de R du Pin pour aucun des

ensembles de sols. Ces variables interviennent néanmoins : lorsque la texture est sableuse, la densité apparente est en général le facteur limitant principal de l'enracinement; sinon c'est le plus souvent la stabilité structurale.

Quoiqu'il en soit, la texture joue un rôle important pour l'enracinement : lorsqu'elle est sableuse, ou équilibrée mais avec au moins 50% de sables, l'enracinement est le plus souvent bon; dans un sol à texture sableuse, la densité d'enracinement R diminue peu avec la profondeur sur une assez grande épaisseur de sol. Dans les sols à texture équilibrée à limoneuse, puis argileuse, l'enracinement est souvent presque entièrement localisé dans la première partie des profils.

Cependant, si l'on considère l'ensemble des sols étudiés, il s'avère que les limons ont un effet défavorable sur l'enracinement (ce qui confirme la droite limite tracée pour le Pin); en effet :

- pour l'Epicéa le coefficient de corrélation partielle significatif de l'une des composantes principales avec R laisse supposer que l'enracinement est plus favorisé par une texture argileuse ou argilo-sableuse que par une texture plus limoneuse (mais cela suppose des stabilités structurales équivalentes),
- et surtout, pour le Pin, le coefficient de corrélation à profondeur et âge constants des limons avec R est négatif et très significatif.

d) La matière organique :

Sa liaison positive avec R apparaît à l'aide des coefficients de corrélation significatifs suivants :

- coefficient de corrélation totale pour les deux essences
- coefficient de corrélation partielle pour le Pin
- coefficient de corrélation partielle de la première composante principale (la structure et sa stabilité), dans laquelle la matière organique intervient, pour l'Epicéa.

Indépendamment de son action par l'intermédiaire des propriétés du sol (densité apparente, stabilité structurale...), la matière organique semble donc jouer un rôle propre favorable à l'enracinement du Pin.

e) La profondeur :

Il a été possible de tracer une droite limite de l'enracinement en fonction de la profondeur, pour les deux essences.

Jusqu'à -30 à -35 cm, l'enracinement de l'Epicéa ne semble guère limité : il est souvent très élevé; il n'en est pas de même pour le Pin. En-dessous de cette profondeur, les deux droites limites sont pratiquement superposables.

La profondeur constitue parfois un facteur limitant important pour l'Epicéa.

La profondeur a un coefficient de corrélation totale avec R négatif et significatif. Mais cela semble être surtout le reflet de la variation des propriétés physiques avec la profondeur : introduite dans la régression concernant les composantes principales, la profondeur y montre un coefficient de corrélation partielle avec R négatif mais non significatif.

f) Les rapports Ca^{++}/T et Al^{+++}/T :

Pour les deux essences, leur coefficient de corrélation avec la densité d'enracinement R à profondeur et âge constants est significatif (positif pour Al^{+++}/T , négatif pour Ca^{++}/T).

La liaison positive entre Al^{+++}/T et R peut surprendre, car plusieurs auteurs ont constaté une influence défavorable de l'aluminium sur l'enracinement. Mais il s'agit, dans notre cas, du rapport Al^{+++}/T , qui est approximativement complémentaire de Ca^{++}/T , lié négativement à R. Ces deux liaisons sont peut-être en partie le reflet d'une action néfaste d'un pH trop élevé sur l'enracinement.

2) Propriétés intervenant pour l'Epicéa seulement :

a) Le potassium :

Son coefficient de corrélation partielle avec R est positif et significatif; il en est de même de celui de la composante principale dans laquelle le potassium joue le rôle essentiel. Cela indique une liaison réelle, bien que masquée (coefficient de corrélation totale non significatif).

Par contre le potassium de l'horizon A1 est lié négativement (coefficient de corrélation partielle significatif) à R des autres horizons.

Rappelons, en ce qui concerne la première de ces liaisons, que KERN et al. (1961) ont également trouvé une corrélation positive du potassium avec l'enracinement de l'Epicéa dans les différents horizons du sol; en ce qui concerne la seconde ils ont montré que l'Epicéa ne s'enracinait profondément que s'il n'y avait pas suffisamment d'éléments nutritifs dans les horizons superficiels.

b) La profondeur d'enracinement Pr 5 (profondeur maximale où l'on trouve une densité de racines d'au moins 5) :

Ses coefficients de corrélation partielle et totale avec l'enracinement de l'Epicéa sont négatifs et significatifs : l'enracinement est d'autant plus faible dans la partie supérieure des profils qu'il est plus profond (ou vice-versa).

3) Propriétés n'intervenant que pour le Pin :

a) Le phosphore :

Il apparaît très souvent en relation avec l'enracinement du Pin. Cette liaison est partout négative, ce qui surprend. Mais tout cela fait partie des relations inter-propriétés existant dans la nature; en cas d'intervention humaine, par exemple de fertilisation, ces relations sont perturbées et la liaison précédente n'est plus forcément vérifiée. Il en est d'ailleurs de même pour les liaisons concernant d'autres variables que le phosphore.

Il a été possible de tracer une droite limite de l'enracinement en fonction du phosphore.

Elle se trouve parmi les plus importantes des droites limites concernant le Pin. Par exemple, R ne peut en général atteindre 30 que si la teneur en phosphore est $< 0,07\%$. Le phosphore peut ainsi limiter R du Pin dans plusieurs ensembles de sols (sur Terra Fusca, limons, grès vosgien); souvent cependant il paraît moins important que l'une des propriétés physiques.

Son coefficient de corrélation partielle, celui de la composante principale où il joue le rôle essentiel, ses coefficients de corrélation à profondeur et âge constants et totale, avec R, sont tous significatifs, ce qui indique une influence à la fois réelle et observable sur l'enracinement du Pin.

Pour expliquer cette liaison négative, on ne peut que se contenter d'hypothèses. Le phosphore diffuse peu dans le sol; les racines ne peuvent puiser que le phosphore qui se trouve à leur voisinage immédiat. On peut donc supposer que les racines doivent être nombreuses dans un horizon où le phosphore est peu abondant. Au contraire, lorsqu'il y a plus de phosphore que n'en exige le Pin (espèce relativement peu exigeante) un nombre moins élevé de racines est peut-être suffisant.

b) Le pH :

La droite limite de l'enracinement R en fonction du pH (liaison négative) est importante pour le Pin. Par exemple, R ne peut atteindre 30 dans un horizon que si le pH est $< 5,4$, et 10 que si le pH est $< 8,5$. Le pH constitue le facteur limitant principal de l'enracinement du Pin dans les sols à calcaire actif (R moyen si les cailloux ne sont pas trop nombreux); cependant, il n'y est guère plus limitant que les propriétés physiques.

Le coefficient de corrélation partielle du pH avec R du Pin est négatif et significatif.

Tout cela confirme le caractère calcifuge que l'on prête au Pin sylvestre.

Il est à signaler que le coefficient de corrélation partielle du pH avec R de l'Epicéa est négatif et presque significatif (au seuil de 5%).

c) L'hydromorphie :

Les coefficients de corrélation partielle, à profondeur et âge constants et totale, entre l'intensité de l'hydromorphie (Hy1) et l'enracinement du Pin sont négatifs et significatifs, alors que pour l'Epicéa seul le coefficient de corrélation totale (le moins intéressant) est significatif.

Ainsi l'hydromorphie semble plus néfaste à l'enracinement du Pin qu'à celui de l'Epicéa.

(Quant à la profondeur de l'hydromorphie, Hy2, alors que son coefficient de corrélation totale avec R des deux essences est négatif et significatif, son coefficient de corrélation partielle avec ces R est significatif et positif; cette dernière liaison est surprenante; peut-être est-elle due au fait que c'est surtout au niveau le moins profond où l'hydromorphie existe dans un sol que l'enracinement est le plus abaissé, par effet-contact).

II - INFLUENCE DE LA PEDOGENESE SUR L'ENRACINEMENT -

Toutes ces propriétés dont dépend l'enracinement sont surtout déterminées par la roche-mère, nous l'avons montré pour certaines d'entre elles. Par exemple, il est bien évident que les sols formés sur grès vosgien ont en général une texture sableuse, un rapport Ca^{++}/T faible, etc...

Cependant la pédogénèse influence parfois d'une façon importante l'enracinement, par l'intermédiaire de l'altération, du lessivage, de la podzolisation, de l'hydromorphie et de la décarbonatation.

1) Altération :

Il est évident que sur roche-mère solide, par exemple des calcaires ou le grès vosgien, l'enracinement ne peut s'étendre en profondeur que si la roche est suffisamment altérée.

D'autre part, les propriétés des roches-mères argileuses épaisses (surtout muschelkalk marneux) sont extrêmement défavorables : lorsque cette roche-mère ne s'est transformée en sol que sur une très faible épaisseur, l'enracinement reste à peu près entièrement superficiel.

2) Lessivage :

Les propriétés physiques des sols lessivés ou bruns lessivés, à pseudogley ou non, particulièrement la stabilité structurale, sont en général nettement plus défavorables dans les horizons B (ou Bg) qu'en A2 (ou A2g), ce qui correspond à une nette diminution de l'enracinement (exemple : sols formés sur Terra Fusca); souvent ce phénomène est accentué par effet-contact (brusque augmentation de la résistance à la pénétration entre A2 et B).

3) Podzolisation :

Le sol de l'une des stations sur grès vosgien (D5) est podzolique; ses propriétés physiques sont très favorables et son enracinement est bon, comme pour les sols bruns oligotrophes formés sur la même roche-mère (grès vosgien). Mais dans la station D6 (non intégrée aux ensembles de sols étudiés précédemment, car très particulière) la podzolisation est plus poussée : son horizon A2 (dont le rapport C/N, de 18,3, est bien plus élevé que celui de la station D5 : 12,3) a une stabilité structurale très basse et un enracinement très faible.

4) Hydromorphie :

L'hydromorphie, qui est souvent une conséquence de la pédogénèse, peut influencer l'enracinement de diverses façons.

Dans certains sols lessivés à pseudogley sur grès vosgien (SAINT-AVOLD) il y a présence, au début de l'horizon Bg, d'une couche peu épaisse mais très dure formée de nombreuses concrétions due à l'hydromorphie. Cette couche forme pour l'enracinement un obstacle difficilement franchissable.

Dans les horizons Bg ou B'g des sols hydromorphes, il y a souvent présence de zones décolorées parfois en bandes verticales, à résistance à la pénétration bien inférieure à celle du reste de l'horizon : l'enracinement est localisé dans ces zones; il y est souvent non négligeable, compte-tenu de la profondeur. L'Epicéa semble, dans la plupart des cas, mieux s'y enraciner que le Pin.

5) Décarbonatation :

Le pH constitue le facteur limitant principal de l'enracinement du Pin pour les sols à calcaire actif. Il est donc logique de penser que la décarbonatation favorise le développement des racines, pour cette essence.

III - COMPARAISON DES ENRACINEMENTS DE L'EPICEA ET DU PIN SYLVESTRE -

Les résultats de cette comparaison sont dans une certaine mesure en opposition avec l'opinion traditionnelle. L'Epicéa a en effet la réputation d'avoir un enracinement très superficiel, nettement moins dense en profondeur que celui du Pin sylvestre.

En fait, pour la grande majorité des ensembles de stations étudiées, l'on constate que, dans des stations comparables :

- l'enracinement de l'Epicéa est le plus souvent très nettement supérieur à celui du Pin dans la partie supérieure des profils jusqu'à par exemple -35 cm.

- au-dessus les densités de racines sont plus rapprochées, mais l'enracinement de l'Epicéa est encore en général le plus fort.

- dans la partie inférieure des profils, à partir de -60 à -70 cm, les densités d'enracinement, faibles, sont en général proches l'une de l'autre.

On ne peut cependant tirer de conclusion pour les sols formés sur alluvions anciennes issues du grès vosgien ou sur grès vosgien à une certaine altitude : seuls des peuplements de Pin y ont été étudiés, et leur enracinement y est bon ou très bon.

La forte différence d'enracinement des deux essences dans les horizons de surface, sans doute spécifique, est accentuée par l'action de la végétation secondaire. Les racines non résineuses ont un coefficient de corrélation partielle avec R des deux essences négatif et significatif : il s'exerce une concurrence interspécifique pour l'enracinement. Cette concurrence est beaucoup plus aiguë pour le Pin que pour l'Epicéa, en raison de la densité en général bien différente de la végétation secondaire sous ces deux essences.

Il est bon de préciser que, par la méthode utilisée, c'est surtout la densité de l'enracinement fin que nous avons mesurée. C'est probablement le très fort enracinement des horizons de surface sous Epicéa, comprenant en particulier la presque totalité des racines grossières, qui conduit souvent les observateurs, par comparaison, à ne pas tenir compte de l'enracinement plus profond, composé presque uniquement de racines fines et évidemment beaucoup moins dense. Au contraire, les racines du Pin sont beaucoup moins denses en surface, et ses racines charpentières s'enfoncent plus profondément; la densité d'enracinement du Pin en profondeur paraît ainsi plus forte que celle de l'Epicéa, ce qui n'est en réalité pas le cas : l'enracinement fin de l'Epicéa n'est pas plus exigeant vis-à-vis des propriétés du sol que celui du Pin, au contraire (les droites limites l'ont montré).

Le fait que l'Epicéa est très plastique, qu'il fournit une production convenable même en sol apparemment défavorable, contrairement au Pin, est peut-être en partie la conséquence du fait qu'alors qu'il possède souvent des racines fines assez profondes, au moins aussi nombreuses que celles du Pin, son enracinement dans les horizons superficiels est presque toujours très élevé, bien supérieur à celui du Pin.

Une remarque est cependant nécessaire : la méthode que nous avons utilisée ne permet pas de tenir compte des racines verticales situées à proximité du tronc, probablement bien plus importantes pour le Pin que pour l'Epicéa.

IV - CONCLUSIONS PRATIQUES -

1) Choix de l'essence :

La valeur de l'enracinement constitue l'une des considérations qui devraient aboutir au choix de l'essence, pour un reboisement. Dans la très grande majorité des cas cet examen serait favorable à l'Epicéa, par rapport au Pin sylvestre (une seule réserve importante : les sols formés sur grès vosgien à une certaine altitude); ce choix de l'Epicéa est d'ailleurs souvent effectif en raison de sa plus forte production en bois. Cependant d'autres considérations, parfois plus défavorables à l'Epicéa, doivent intervenir dans ce choix : risques de chablis, microclimat (les stations trop sèches peuvent être dangereuses pour l'Epicéa) etc... De plus, il serait intéressant de comparer à celui de l'Epicéa l'enracinement de certains Résineux exotiques très productifs.

2) Prévision de l'enracinement :

L'examen des droites limites constitue l'une des méthodes de prévision de l'enracinement : de la mesure de certaines propriétés du sol on déduit, à l'aide de ces droites, l'enracinement maximum possible dans l'horizon considéré; on obtient ainsi une certaine idée de l'enracinement futur. La mesure d'une ou deux propriétés sera même suffisante si l'on parvient à rattacher le sol (d'après sa roche-mère) à l'un des ensembles de sols étudiés. D'ailleurs le seul fait de savoir à quel ensemble appartient un sol peut fournir une idée de son type d'enracinement.

L'analyse de régression progressive a fourni des équations qui permettent de calculer R d'un horizon à l'aide d'un nombre plus ou moins élevé de propriétés du sol. Rappelons à titre d'exemple l'une de ces formules, valables pour l'Epicéa :

$$R = 1,55 d' + 4,16 \sum + 6,02 \text{ mat. organ.} - 1,20 \text{ cailloux} \\ - 0,0382 \text{ profondeur} + 0,0225 \text{ Hy}^2 + 4,43 \text{ potassium} + 2,31$$

(la plupart de ces variables a subi une transformation: il est donc nécessaire d'utiliser les variables transformées pour calculer R).

La précision (toute relative) de ces méthodes peut être en partie perturbée par certains phénomènes : présence d'un grand nombre de cailloux, infiltrations de matière organique, propriétés nettement différentes des horizons voisins (effets-contacts).

3) Amélioration de l'enracinement :

Nous avons pris connaissance, grâce à l'établissement des coefficients de corrélation partielle, des propriétés du sol liées à R quelle que soit la valeur prise par les autres propriétés; pour certaines d'entre elles il s'agit peut-être d'une liaison de causalité.

C'est pourquoi l'on peut envisager, en agissant sur ces propriétés, d'améliorer l'enracinement; l'efficacité de ces méthodes devrait cependant être testée dans une expérimentation préalable.

Les mesures pouvant s'avérer ainsi les plus efficaces consisteraient à :

- Pour l'Epicéa:-

- Améliorer la structure et sa stabilité sur une assez grande épaisseur de sol.
- Fertiliser, et en particulier apporter des engrais potassiques, en profondeur (à l'aide d'une sous-soleuse ?), en raison de la liaison (coefficients de corrélation partielle) de l'enracinement avec le potassium de l'horizon considéré (positive), le potassium de l'horizon A1 et la profondeur d'enracinement Pr 5 (négatives) (en effet, la liaison négative entre R et Pr 5 signifie que plus l'enracinement est élevé dans les horizons supérieurs, moins il est profond; d'où l'utilité de fertiliser en profondeur et non en surface).

- Pour le Pin :

- Drainer les sols hydromorphes.
- Combattre la végétation secondaire, tout en favorisant le maintien d'un certain taux de matière organique dans le sol.

Le travail qui vient d'être effectué concerne surtout l'enracinement fin. Il serait utilement complété par une étude des racines charpentières, très importantes également (ancrage de l'arbre, rôle dans la structuration du sol, amélioration de la perméabilité du sol par création de canaux de drainage); cette étude s'avère cependant plus difficile, matériellement, à réaliser (nécessité de travaux de terrassements).

ANNEXE I

DESCRIPTION DES PROFILS

Les profils de sols ont été décrits d'une façon classique. On a cependant mis l'accent sur ce qui était susceptible à priori d'avoir une influence sur l'enracinement : couches de cailloux, différences de résistance à la pénétration, traces d'hydromorphie.

La couleur des sols a été désignée à l'aide du code expolaire de CAILLEUX et TAYLOR; chaque fois que la dénomination tirée de ce code ne semble pas correspondre exactement à l'impression visuelle, cette dernière est également mentionnée.

L'abondance de chaque espèce de la végétation secondaire située à proximité de la fosse pédologique a été indiquée ainsi :

+	+	+	espèce dominante ou très abondante
+	+		espèce abondante
+			espèce disséminée
(rien)			présence occasionnelle.

A l'aide des descriptions de profils et de certains résultats d'analyse chimique, on a déterminé les types de sols ; ils ont été indiqués en tête de chaque description. Certains de ces noms ne correspondent peut-être pas exactement à la pédogénèse subie par le sol; ainsi des sols ont été qualifiés de " lessivés " alors qu'il y a peut-être hétérogénéité de la roche mère : dans ce cas le lessivage n'est pas certain.

SIVRITE - STATION 2 (S2) : SOL BRUN LESSIVE

- Emplacement : Arboretum de la Sivrite, plateau 4
- Roche-mère : Terra fusca recouvrant le calcaire bajocien
- Peuplement : Ficea excelsa, origine Riga, plantation 1934.
- Végétation secondaire :

- . Strate arbustive :

Fagus sylvatica + - Corylus avellana +

- . Strate herbacée :

Hedera hélix ++ - Lonicera periclymenum +
Luzula albida + - Rubus sp. - Galium sylva-
ticum - Convallaria maialis - Minium sp. -
Thuidium sp.

PROFIL :

- A₀ : de 0 à + 2cm - Litière en décomposition
- A₁ : de 0 à $\begin{pmatrix} -3 \\ -8 \end{pmatrix}$ cm - Mull forestier. En mélange : grumeaux irréguliers de 1 à 3 mm et une structure fondue. Brun-jaune foncé. Limoneux. Assez peu dur à la pénétration. Enracinement réparti irrégulièrement.
- A₂ : Jusqu'à $\begin{pmatrix} -35 \\ -40 \end{pmatrix}$ cm - Jaune. Structure fondue, avec nombreuses inclusions de l'horizon A₁ à structure grumeleuse (1/3 de la surface); l'enracinement est dense dans ces inclusions - assez peu dur à la pénétration.
- B : Jusqu'à - 75 cm - Jaune-rougeâtre. Structure polyédrique à prismatique; unités assez plates, d'environ 2 cm de long; clayskins - Résistant à la pénétration. Enracinement très faible.
- C : Sous -75 cm - Flus jaune. Polyèdres moins nets, tendance à structure fondue. Argileux. Semble moins résistant à la pénétration que l'horizon précédent.

- SIVRITE - STATION 1 (S1) : Sol brun lessivé

- même plateau et peuplement que S2
- A_1 : de 0 à $\begin{pmatrix} -2 \\ -8 \end{pmatrix}$ cm - A_2 : jusqu'à -30 cm - A_2g/Bg : jusqu'à $\begin{pmatrix} -45 \\ -60 \end{pmatrix}$ cm - Bg : jusqu'à -90 cm.
- Une légère hydromorphie apparaît : léger bariolage rouge - jaune - gris et concrétions noires violettes en A_2g/Bg ; aspect un peu bleuâtre ou grisâtre en Bg.
- Le sol, friable en A_2 , devient ensuite plus dur.

- SIVRITE - STATION 3 (S3) : sol brun lessivé

- même plateau et peuplement que S2
- profil très semblable à celui de S2

- SIVRITE - STATION 4 (S4) : Sol brun lessivé

- Forêt de Haye, parcelle 12 - Sur aalénien et colluvium de pente
Epicéas de 45 ans.
- A_1 : 0 à 9 cm - A_2 : -9 à -35 cm - B : -35 à -90 cm.

- SIVRITE - STATION 8 (S8) : Sol lessivé

- Sivrite, plateau 10 - Pins de 27 ans.
- Lessivage plus accentué que pour S2.
- A_1 : 0 à -5 cm - A_2 : de -5 à -40 cm - B : de -40 à -100 cm
- La dureté augmente nettement après -40 cm et après -70 cm.
- Très légère marmorisation en profondeur.

- SIVRITE - STATION 9 (S9) : Sol lessivé marmorisé

- Sivrite, plateau 17 - Pins de 27 ans.
- Lessivage plus accentué que pour S2
- A_1 : 0 à $\begin{pmatrix} -10 \\ -22 \end{pmatrix}$ cm - A_2 : jusqu'à -34 cm - Bg : de -34 à -80 cm
- en Bg taches et concrétions noires-violettes, taches gris-bleuâtre.
- La dureté augmente nettement de A_2 à Bg.

SIVRITE - STATION 5 (S5) : SOL BRUN MESOTROPHE

- Emplacement : Arboretum de la Sivrite, plateau 16
- Roche-mère : colluvium de Terra Fusca (légère pente)
- Peuplement : Ficea excelsa, plantation 1942
- Végétation secondaire :

. Strate arbustive :

Corylus avellana ++ - Carpinus betulus + -
Quercus sessiliflora + - Crataegus monogyna + -
Salix capraea - Cornus sanguinea - Rhamnus
frangula - Frunus spinosa - Viburnum opulus.

. Strate herbacée :

Hedera helix ++ - Lonicera xylosteum + -
Galium sylvaticum + - Rubus sp. - Convalla-
ria mafalis - Polygonatum multiflorum.

PROFIL :

- A₁ : de 0 à -15 cm - Brun-jaune foncé (F63) - mull - Petits grumeaux de 2 à 3 mm peu nets - argilo-limoneux - friable - quelques cailloux arrondis de 1 à 2 cm - assez poreux - Enracinement dense. Limite peu nette, ondulée.
- (B) : de -15 à $\begin{pmatrix} -36 \\ -49 \end{pmatrix}$ cm - Brun-jaune foncé (F63), mais apparaît plus clair que A₁. Surtout particulière avec quelques agrégats. Taches de sol plus organique identique à A₁, de 1 à 4 cm, pas très abondantes. Assez poreux. Friable. Cailloux rares. Assez fort enracinement, racines petites et moyennes. Lombrics. Limite nette et ondulée.
- C : de $\begin{pmatrix} -36 \\ -49 \end{pmatrix}$ à -102 cm - Brun vif (E56). Fondu. Limono-argileux. Compact. Dur. Enracinement très faible. Au bas de l'horizon, nombreux cailloux roulés.

- SIVRITE - STATION 6 (S6) : Sol brun mésotrophe ou sol peu évolué
(ranker de pente)

- Forêt de Haye, parcelle 12. Plus éloignée de la route que la Station 4. Non loin du bas de pente. Roche-mère : aalénien et colluvium de pente. Epicéas de 45 ans.
- Sol superficiel. 20% de cailloux plats dès l'horizon A₁, puis de plus en plus nombreux.

AMANCE - STATION 1 (A1) - PSEUDOGLEY

- Emplacement : Arboretum d'Amance, face à l'entrée de la pépinière.
- Roche-mère : Limons, recouvrant les marnes feuilletées ferrugineuses à Amaltheus margaritatus du Charmouthien.
- Petit bouquet de Picea excelsa de 38 ans.
- Végétation secondaire :

. Strate arbustive :

Fagus sylvatica + - Quercus pedunculata + -
Abies grandis -

. Strate herbacée :

Hedera helix ++ - Rubus sp. + - Milium
effusum + - Viola sp. - Veronica sp.

- . A proximité du bouquet d'Epicéa, mais dans une zone non boisée :

Milium effusum ++ - Poa chaixii + - Geranium
sp. + - Dactylis glomerata + - Polygonatum
multiflorum + - Taraxacum dens-leonis + -
Deschampsia coespitosa + - Stellaria holostea.

PROFIL :

- A₀ : de 0 à $\begin{pmatrix} +1 \\ +2 \end{pmatrix}$ cm - Litière en décomposition.
- A₁ : de 0 à $\begin{pmatrix} -2 \\ -8 \end{pmatrix}$ cm , plus des infiltrations dans l'horizon suivant Brun (F72). Grumeaux de 1 à 10 mm irréguliers. Limono-argileux. De friable à cohérent. Poreux.
- A₂ et A_{2g} : de $\begin{pmatrix} -2 \\ -8 \end{pmatrix}$ cm à - 40 cm - Brun jaune (E66). Petites taches rouilles, brunes et noires de plus en plus fréquentes vers la partie inférieure. Fondu à particulaire, cohérent quand fondu. Limoneux. Porosité assez grande.
- A_{2g}/Bg : de -40 à -55 cm en moyenne. Plus brun que l'horizon précédent. Concrétions noires-violettes assez nombreuses; taches et même lignes verticales blanches, mais pas très nettes. De fondu à polyédrique.

- Bg : de -55 à -75 cm. - Couleur générale plus foncée, nuance rougeâtre, bariolé de blanc et de rouille; grosses concrétions noires-violettes très nombreuses; des raies blanches verticales le long de certaines racines. Structure polyédrique (1 à 3 cm); des clays-skins - Argilo-limoneux - Des fissures verticales.
- B'g : Sous -75 cm - Identique à l'horizon précédent, à part la structure qui tend à devenir fondue.

- AMANCE - STATION 2 (A2) : Pseudogley

- Bouquet d'Epicéas de 38 ans proches du centre de l'arboretum.
- Profil très semblable à celui de la Station 1.

- AMANCE - STATION 3 : Sol brun lessivé à pseudogley

- Parcelle 56 de l'arboretum - Pins de 27 ans.
- A₁ : de 0 à -10 cm - A₂ : de -10 à -40 cm - Bg commence à -40 cm, mais la marmorisation est d'abord peu accentuée; elle ne devient très nette qu'à partir de -90 cm.

- AMANCE - STATION 4 : Pseudogley

- Proche de la Station 3, un peu plus bas (très légère pente). Pins de 27 ans.
- A₁ : de 0 à -11 cm - A_{2g} : de -11 à -26 cm - A_{2g}/Bg : de -26 à -43 cm. Bg à partir de -43 cm. L'hydromorphie apparaît plus près de la surface que dans la Station 3.

SAINT-AVOLD

- Les sols de Saint-Avold ont en général en profondeur une couche rouge à rose, tassée, ayant un aspect de pseudogley typique; cette couche est parfois enrichie en argile par rapport aux horizons précédents, parfois aussi en fer. Il s'agit peut-être d'un horizon fossile, mais dans le doute on l'appellera Bg ou B'g, suivant les Stations.

- Parfois se manifeste un début de podzolisation dans la partie supérieure du profil, se superposant au profil de sol plus ou moins lessivé.

- Avant le peuplement actuel, il y avait des feuillus dans les stations de Saint-Avold.

SAINT-VOLD - STATION 1 (Sal) : Sol brun lessivé à pseudogley

- Emplacement : Forêt domaniale de Saint-Avold (comme les autres stations de Saint-Avold), parcelle 167 a
- Roche-mère : Grès vosgien (comme toutes les stations de Saint-Avold).
- Peuplement : Pinus sylvestris de 40 ans
- Végétation secondaire :
 - . Strate arbustive :
Rhamnus frangula ++ - Quercus pedunculata + -
Salix caprea.
 - . Strate herbacée :
Pteris aquilina +++ - Deschampsia flexuosa +++
Vaccinium myrtillus - Calluna vulgaris -

PROFIL :

- A₀ : de 0 à +5cm - Matière organique peu décomposée et lacs de racines fines de la végétation herbacée.
- A₁ : de 0 à -15 cm en moyenne - "Brun rouge foncé" (H21), mais tend vers le noir. Moder typique : De particulaire à fondue, avec quelques boules noires de matière organique entourées de particules minérales brillantes. Texture sableuse, comme l'ensemble du profil. Lacs abondant de racines fines de la végétation herbacée; les racines de Pin semblent se trouver surtout à la partie inférieure de l'horizon.
- A₁/A₂ : de -15 à -25cm - "Brun-jaune" (E64) : aspect ocre-pâle plus ou moins mélangé de noir. Quelques poches de matière organique noire. Particulaire. Très peu cohérent.
- A₂ : de -25 à $\begin{pmatrix} -60 \\ -70 \end{pmatrix}$ cm - Jaune un peu ocre avec une nuance de rose. De particulaire à fondu mais très friable. Quelques cailloux non gréseux de 2 à 20 mm. Très pénétrable. Enracinement à densité moyenne.
- Bg : de $\begin{pmatrix} -60 \\ -70 \end{pmatrix}$ cm à -85 cm - Couleur d'ensemble "jaune rouge" (D48), mais cet horizon est bariolé : petites surfaces rouilles, plages blanches. Concrétions noires-violettes. Nettement moins pénétrable que les horizons précédents. 10 à 20% de cailloux roulés irréguliers non gréseux. Enracinement très faible.
- B'g : à partir de -85 cm - Rouge, avec des trainées blanches dirigées en tous sens. Des concrétions noires. Les parties rouges sont nettement moins pénétrables que les parties blanches; les racines présentes ne se trouvent d'ailleurs que dans les parties blanches.

- SAINT-AVOLD - STATION 2 (Sa2) : Sol lessivé à pseudogley

- Parcelle III - Pins de 40 ans
- Comme pour presque toutes les stations de Saint-Avold, la pénétrabilité diminue assez nettement au début de l'horizon Bg, ici vers -65 cm; ce phénomène correspond d'ailleurs à une diminution assez nette de l'enracinement.

- SAINT-AVOLD - STATION 3 (Sa3) : Sol lessivé à pseudogley

- Parcelle 133 - Epicéas de 41 ans.
- Le sol est très pénétrable jusqu'à -65cm, puis se trouve un niveau peu épais très dur comportant de nombreuses concrétions noires sur fond violet et rose; cette couche arrête brutalement l'enracinement.

- SAINT-AVOLD - STATION 4 (Sa4) : Sol lessivé à pseudogley

- Parcelle 134 b - Pins de 35 ans.
- Il semble y avoir, sous A₁, une ébauche de podzolisation : il y a peut-être évolution vers un sol ocre podzolique.
- Vers -68 cm la pénétrabilité devient nettement plus faible; il y a d'abord une couche plus ou moins concrétionnée, rouge violacée, avec nombreuses concrétions noires; dessous se trouve un horizon Eg de pseudogley, typique.

- SAINT-AVOLD - STATION 5 (Sa5) : Sol brun oligotrophe

- Parcelle 133 a - Epicéas de 28 ans. Située à une altitude plus faible que les autres stations de Saint-Avold.
- Le sol est peut-être légèrement lessivé.
- de -60 à -70 cm se trouve une couche de cailloux (jusqu'à 20 cm de long) certains plats, d'autres roulés, occupant 50% du volume général à cette profondeur.
- A partir de -70 cm, le sol est formé à peu près uniquement de sables grossiers. L'horizon durci à pseudogley n'existe pas, contrairement aux autres stations.

- SAINT-AVOLD - STATION 6 (Sa6) : Sol lessivé à pseudogley

- Parcelle 152 a - Epicéas de 42 ans.
- L'horizon Bg commence vers -60 cm; le sol y est beaucoup moins pénétrable qu'avant. Cet horizon contient 30% de cailloux, certains roulés, d'autres anguleux.

VERDUN ET COMMERCY

Les sols étudiés des Inspections de Verdun et Commercy sont très semblables, car tous formés sur roche-mère calcaire du jurassique supérieur, aussi ne décrirons-nous qu'une seule station : V4.

VERDUN - STATION 4 (V4) : SOL BRUN CALCAIRE

- Forêt de Verdun 7ème série de Douaumont, parcelle 3 :
- Roche-mère : oxfordien. Pente : environ 5%
- Peuplement : Picea excelsa de 31 ans, avec un mélange :
Alnus glutinosa - Alnus incana - Fraxinus excelsior.
- Végétation secondaire :
 - Crataegus monogyna ++ - Cornus sanguinea ++ -
Lonicera xylosteum -
 - Listera ovata ++ - Clematis vitalba + - Arrhenatherum elatius + - Equisetum sp.

PROFIL :

- A₀ de 0 à +2 cm - Litière formée surtout d'aiguilles d'Epicéa.
- A₁ de 0 à $\begin{pmatrix} -9 \\ -12 \end{pmatrix}$ cm - " Brun olive " (F72) (aspect brun foncé).
Petits grumeaux irréguliers durs de 3 mm en moyenne, certains atteignant 10 mm - argileux - Environ 10% de cailloux calcaires. Lombrics.
- (B) de $\begin{pmatrix} -9 \\ -12 \end{pmatrix}$ cm à -60 cm environ. D'abord " brun " (E72), de polyédrique à fondu ; puis " brun-jaune " (E63), fondu - Dur. Argileux - vers -30cm, 30% de cailloux environ, puis cette proportion diminue : 15% environ vers -45 cm. Dans la partie inférieure de l'horizon, unités structurales brillantes (Slikensides).

- (B)/C : A partir de -60 cm environ. Jusqu'à -75 cm : " brun olive " (F74), nettement plus clair que F72 de A₁), avec un mélange un produit blanc provenant de la décomposition du calcaire. En-dessous de -75 cm, à certains endroits, roche calcaire en place, à d'autres cailloux calcaires désagrégés en une poudre blanche plus ou moins mélangée de sol argileux.

- VERDUN - STATION 1 (V1) : Sol brun calcaire

- Forêt de Verdun, 4ème série du Breuil, parcelle 13. Oxfordien. Pins de 32 ans.
- Vers -40 cm on trouve une couche de cailloux souvent très gros.

- VERDUN - STATION 2 (V2) : Sol brun calcaire

- Forêt de Verdun, 4ème série du Breuil, parcelle 11. Oxfordien. Pente d'environ 12%. Pins de 31 ans.
- La roche, presque continue, se trouve vers -40 à -50 cm.

- VERDUN - STATION 3 (V3) : Sol brun calcimorphe

- Forêt de Verdun, 4ème série du Breuil, parcelle 14. Oxfordien. Epicéas de 34 ans.
- A₁ épais (22 cm). L'enracinement paraît excellent jusqu'à -32 cm, puis apparaissent de très nombreux cailloux calcaires.

- VERDUN - STATION 5 (V5) : Sol brun calcaire

- Forêt de Verdun, série Anglemont, parcelle 4 - Rauracien - Pente d'environ 7% - Pins de 30 ans.

- Très nombreux cailloux calcaires dans tout le profil : déjà 50% en A_1 , puis encore plus. Les unités structurales (grumeaux en A_1 , puis polyédres) sont très dures. En profondeur se trouve probablement un horizon " Ca ". La légère augmentation de l'enracinement en profondeur est peut-être à rapprocher du fait que le "sol " y est nettement plus pénétrable qu'avant.

- VERDUN - STATION 6 (V6) : Sol brun calcaire

- Forêt de Verdun, série Anglemont, parcelle 12 - Rauracien - Epicéas de 28 ans.
- Beaucoup de cailloux dans le profil : environ 40% en A_1 , puis 75%; dans la partie inférieure du profil, cette proportion diminue (40%); cela est peut-être à rapprocher du fait que l'enracinement est un peu plus dense pour le 3ème prélèvement que pour le 2ème.

- VERDUN - STATION 7 (V7) : Sol brun calcaire

- Forêt de Verdun, série des Caures, parcelle 39 - Sequanien - Fins de 29 ans.
- Profil superficiel : 45 cm au maximum. Comme pour les autres stations de ce type (Verdun et Commercy) : unités structurales dures, assez nombreux cailloux.

- VERDUN - STATION 8 (V8) : Sol brun calcaire

- Forêt de Verdun, série du Poivre, parcelle 25. Eboulis de rauracien. Epicéas de 30 ans.
- Le sol est assez friable, contrairement à la plupart des autres stations de Verdun; cela est peut-être à rapprocher du fait que l'enracinement en A_1 y est le meilleur de toutes les stations de Verdun. A partir de 1-50 cm, à certains endroits se trouvent des couches formées uniquement de cailloux; cette barrière mécanique explique peut-être l'enracinement très faible au dernier prélèvement.

- VERDUN - STATION 9 (V9) : Sol brun calcaire

- Forêt de Verdun, série du Foivre, parcelle 29. Eboulis de rauracien. Pente d'environ 15%. Pins de 28 ans.
- Profil très peu profond : 50 cm en moyenne. Grumeaux friables en A₁, mais les cailloux sont extrêmement nombreux : 80% en A₁, puis 90%.

- COMMERCY - STATION 1 (C1) : Sol brun calcimorphe

- Forêt domaniale de Commercy - Séquanien - Epicéas de 31 ans.
- Profil assez superficiel. Unités structurales dures. Pas de cailloux en A₁, 25% en (B), puis 80%.

- COMMERCY - STATION 2 (C2) : Sol brun calcaire

- Forêt particulière à Pagny-la-Blanche-Côte (Meuse) - Oxfordien - Légère pente - Epicéas de 32 ans.
- Profil d'environ 60 cm d'épaisseur. Enracinement très dense en A₁.

- COMMERCY - STATION 3 (C3) : Sol brun calcaire

- Forêt particulière, à Montbras (Meuse). Sur argovien et sans doute colluvium de bas de pente. Epicéas de 40 ans.
- Cailloux nombreux en A₁ (50%), moins nombreux ensuite jusqu'à -50 cm (15%), puis 60% à 70% jusqu'au bas du profil (-80 cm).

SAINT-DIE - STATION 2 (D2) : SOL BRUN LESSIVE

A PSEUDOGLEY

- Emplacement : Forêt communale de Remomeix, parcelle 3.
- Roche-mère : Alluvions anciennes - station à peu près horizontale.
- Peuplement : Pinus sylvestris de 31 ans. Sous-étage d'Abies pectinata (mais assez loin du profil). Auparavant cette station possédait un peuplement pur d'Abies pectinata.
- Végétation secondaire :
 - . Strate arbustive :
Rhamnus frangula ++ - Quercus pedunculata + -
Sorbus aucuparia.
 - . Strate herbacée :
Deschampsia flexuosa +++ - Rubus sp. +++ -
Pteris aquilina + - Calluna vulgaris -
Vaccinium myrtillus.

PROFIL :

- A₀ : de 0 à +6 cm - matière organique plus ou moins en voie de décomposition.
- A₁ : de 0 à -10 cm, parfois à -15 cm - " brun gris foncé " (H62) en moyenne. Par endroits, mull à grumeaux de 1 à 10 mm, friables; à d'autres endroits moder typique à boules noires de matière organique mélangées à des particules minérales brillantes. Lacis de radicelles de la végétation secondaire; l'enracinement du Pin semble assez faible en A₁. Limite nette à certains endroits (où moder), peu nette à d'autres.
- A_{2g} : de -10 (ou -15) cm à -38 cm - " Brun jaune " (E63 puis E66); aspect jaune pâle en général, grisâtre par endroits; quelques taches rouilles peu nettes. De particulaire à fondu, mais friable. De nombreux trous et matières organiques, venant sans doute des racines du peuplement précédent (sapins pectinés). Assez pénétrable. 10% de cailloux roulés souvent quartzeux, en général de 1 à 3 cm. Limité inférieurement à certains endroits par une ligne rouille très nette, sous laquelle se trouvent de petites concrétions noires-violettes.

- Bg : de -38 à -70 cm - Fond " brun-jaune " (E66); bariolage rouille et gris et concrétions noires peu dures; ce bariolage est de plus en plus accentué vers la profondeur - De la matière organique en décomposition (anciennes grosses racines). Environ 20% de cailloux roulés. Fondu.
- B'g : à partir de -70 cm. Aspect général " jaune rouge " (D56); surfaces roses et rouilles alternant avec des surfaces blanches dont certaines sont verticales; concrétions noires-violettes peu dures; cailloux roulés (environ 10%). L'alternance des couleurs est de plus en plus accentuée vers la profondeur. Les racines présentes ne se trouvent que dans les parties blanches.

- SAINT-DIE - STATION 1 (D1) : Sol brun lessivé à pseudogley

- Forêt communale de Remomeix, parcelle 3, à proximité de la Station 1. Mêmes caractéristiques que la Station 1.
- Le passage de l'horizon A₂, à l'horizon B se traduit, entre autres, par une nette augmentation de la dureté; la diminution nette de l'enracinement est peut-être en relation avec ce fait. Fuis, à partir de -60 cm le sol redevient beaucoup plus pénétrable et l'enracinement augmente un peu.

SAINT-DIE - STATION 4 (D4) : SOL BRUN OLIGOTROPHE

- Forêt communale de Taintrux, 1ère série, parcelle 42
- Roche-mère : éboulis de grès vosgien seuls ou mélangés au grès permien.
Pente : environ 15%, exposition Sud-Ouest.
- Peuplement : Pinus sylvestris de 32 ans.
- Végétation secondaire :
 - . Rhamnus frangula
 - . Rubus sp.+++ - VACCINIUM MYRTILLUS ++ -
Deschampsia flexuosa + - Teucrium scorodonia -
Luzula albida -

PROFIL :

Sol apparemment très peu différencié, semble avoir une couleur uniforme à tendance violette.

- A₀ : de 0 à +5 cm - Litière en décomposition. Tortillons de Lombrics.
- A₁ : de 0 à -9 cm - " brun rouge foncé " (H42), nuance violette. Mull acide tendant par endroits vers un moder. Sableux. Poreux. Friable. Assez pénétrable. Transition avec (B) peu nette quant à la teinte, mais (B) est un peu plus compact; transition rectiligne.
- (B) : à partir de -9 cm - " Brun rouge " (F24), mais nuance lie de vin très nette. Fondu mais peu cohérent. Relativement pénétrable; à partir de -50 cm, semble plus compact. Environ 5% de cailloux, arrondis ou anguleux, en général petits (quelques mm).

- SAINT-DIE - STATION 3 (D3) : Sol brun oligotrophe

- Forêt communale de Saint-Dié, 4ème série, parcelle 15. Eboulis de grès vosgien seuls ou mélangés au grès permien. Pente d'environ 40%. Exposition Nord-Nord-Ouest. Pins de 31 ans.
- Le profil a 75 cm de profondeur. L'humus est surtout un moder, mais à certains endroits se trouve un mull, et localement c'est un vrai mor. A certains endroits, il y a sous A₁ une décoloration sur quelques cm d'épaisseur (début de podzolisation ?).

SAINT-DIE - STATION 5 (D5) : SOL PODZOLIQUE

- Forêt communale de Saint-Dié, 3ème série, parcelle H.
- Roche-mère : grès vosgien. Pente : environ 30%. Exposition : sud.
- Peuplement : Pinus sylvestris de 34 ans - Fagus sylvatica - Abies pectinata (mais loin du profil).
- Végétation secondaire :

. Strate arbustive :

Fagus sylvatica ++ - Quercus pedunculata + -
Rhamnus frangula + - Abies pectinata -
Sorbus aucuparia -

. Strate herbacée :

Molinia coerulea +++ - Pteris aquilina ++ -
Vaccinium myrtillus ++ - Deschampsia flexuosa -

PROFIL :

- A₀ : de 0 à +5 cm - Horizon organique fibreux.
- A₁ : de 0 à -10 cm - " gris rouge " (E41) (aspect gris noir violacé). Petites boules organiques de 1 à 20 mm et très nombreuses particules minérales brillantes - plusieurs trous de 2 - 3 cm. 10% de cailloux roulés quartzeux ou gréseux (1 à 3 cm) à l'endroit du prélèvement ; ailleurs certains très gros cailloux. Sableux, comme tout le profil. Limite moyennement nette.
- A₂ : de -10 à -42 cm. " brun très pâle " (C54), petite nuance rose en bas de l'horizon ; certaines unités structurales plus ou moins arrondies de 1 à 20 mm, friables, mais la structure est surtout particulière et meuble. Très pénétrable, 25% de cailloux, les uns roulés quartzeux (venant sans doute du conglomérat), les autres gréseux.

- BFe : de -42 à -90 cm - " jaune rouge " (D46), certaines parties roses; beaucoup plus vif que A₂. Structure plus ou moins polyédrique (souvent de 1 à 3 cm). Entre -42 et -63 cm, au moins 50% de cailloux roulés et morceaux de grès; les racines de Pins traversant cette couche sont très sinueuses à l'endroit du prélèvement (-63 à -73 cm), 25% de cailloux de 2 mm à 3 cm.
- C : à partir de -90 cm - mélange de grès entièrement désagrégé, de morceaux de grès et de cailloux roulés quartzeux, " Rouge " (E23). Une très forte proportion de la surface est dure (cailloux, grès) mais à certains endroits l'horizon est beaucoup moins dur : là se trouvant les racines, et l'on y a effectué le prélèvement (environ 25% de cailloux).

- SAINT-DIE - STATION 6 (D6) : Sol podzolique (sans doute formé sur un autre sol podzolique, à pseudogley)

- Forêt communale de Nayemont-les-Fosses, parcelle 20.
- Roche-mère : probablement colluvium de grès vosgien pour la partie supérieure du profil, grès permien pour sa partie inférieure. Légère pente - Pins de 39 ans.
- Le profil a un aspect complexe et très variable suivant les endroits. En surface se trouve un humus brut d'au moins 10 cm d'épaisseur, puis un horizon A₁ comportant des trous d'anciennes racines. Jusqu'à -35 cm se trouve un sol podzolique peu épais avec un BFe assez dur. De -36 à -49 cm il y a un horizon comportant visiblement un pourcentage assez fort de matière organique, en particulier de -39 à -41 cm, où se trouve une matière organique noire, ayant encore une structure organisée visible. De -49 à -60 cm, du moins à certains endroits, il y a un horizon presque blanc, extrêmement dur. Sous cet horizon se trouve un pseudogley.



MIRECOURT

On a été amené à effectuer un groupement un peu arbitraire des stations :

- Ainsi la station 9 bien que ne se trouvant pas sur la même roche-mère, a été jointe aux stations 1, 3, 7 et 8, mais toutes ces stations possèdent des types de sol assez semblables, formés sur roche-mère très argileuse; au-dessus de cette roche-mère se trouvent des horizons nettement moins argileux.

- La station 2 a été jointe aux stations 4 et 6, bien qu'ayant une origine très différente; mais l'on constate certains traits communs dans les profils.

MIRECOURT - STATION 3 (M3) : SOL BRUN LESSIVE

MARMORISE

- Forêt communale de Moriville (Vosges), route de Moriville à Damas-aux-Bois.
- Roche-mère : Muschelkalk marneux - station à peu près horizontale.
- Peuplement : Finus sylvestris de 32 ans.
- Végétation secondaire :

- . Carpinus betulus + - Quercus pedunculata ++ - Fraxinus excelsior ++ - Cerasus avium - Cornus sanguinea + - Crataegus monogyna + -
- . Brachypodium sylvaticum +++ - Fragaria vesca + -

PROFIL :

- A₀ : de 0 à +2 ou 3 cm - Débris végétaux en décomposition.
- A₁ : de 0 à -5 cm - Brun pâle. Grumeaux peu nets, friables, surtout de 2 - 3 mm. Trous de Lombrics. Cailloux : 10%, petits irréguliers, non calcaires.
- A₁/A_{2g} : de -5 à -20 cm - " Brun gris " (F62) - De grumeleux (peu net) à fondu, mais friable. Cailloux (comme en A₁). Des concrétions noires.
- A_{2g} : de -20 à -40 cm. Couleur d'ensemble " jaune pâle " (C74), avec de grandes surfaces plus brunes et foncées, de petites taches rouilles, des concrétions noires peu dures. De particulaire à fondu. De mauble à friable. Cailloux (comme en A₁). Facilement pénétrable. Trous de Lombrics.
- Bg : à partir de -40 cm.
 - de -40 à -53 cm. Aspect d'ensemble " brun jaune " (D63); certaines surfaces à nuance grise; des parties presque rouilles assez nombreuses; de très nombreuses concrétions noires. Petites polyédres (1 cm) se groupant en polyédres plus gros, le tout plus ou moins fondu, mais assez friable. Des fentes verticales débutent à ce niveau et se poursuivent jusqu'au bas du profil. Cailloux : environ 3%.
 - de -53 à -85 cm. Bariolage gris et rouille; nombreuses concrétions noires pas très dures. Fondu. Souvent très tassé et très peu pénétrable, contrairement au niveau précédent (-40 à -53 cm).
 - à partir de -85 cm. Bariolage plus net que précédemment, gris rouille; quelques taches rouilles. Beaucoup moins compact et plus pénétrable que le niveau précédent.

- MIRECOURT - STATION 1 (M1) : Sol brun lessivé marmorisé

- A proximité de la Station 3 - Même roche-mère - Epicéas de 28 ans.
- Profil très semblable à celui de la Station 3.

- MIRECOURT - STATION 7 (M7) : Pseudogley

- Forêt communale de Senonges (Vosges), parcelle hors aménagement, à proximité de la route Senonges-Relanges. Sans doute muschelkalk, peut-être recouvert d'un matériau d'origine différente. Fente très légère.
Epicéas de 36 ans.
- L'horizon A_{2g} est plus ou moins infiltré de matière organique (horizon A_1).
- L'horizon Bg va de -40 à -69 cm; Bg est, par endroits, durci par la très grande quantité de concrétions noires présentes. Puis se trouve une roche-mère possédant 2 couleurs plus ou moins séparées en lits superposés : verdâtre clair et lie de vin.

- MIRECOURT - STATION 8 (M8) : Sol brun lessivé marmorisé

- Au nord-Ouest de la D6 Darney-Lerrain (Vosges) au niveau de la jonction avec la N 460 Darney-Epinal. Sans doute muschelkalk, probablement recouvert d'un matériau d'origine différente.
Station à peu près plate - Pins de 44 ans.
- A_1 épais, grumeleux, à concrétions noires; l'hydromorphie commence non loin de la surface; Bg est par endroits durci dans son ensemble par des concrétions noires nombreuses. Roche-mère débutant vers -40 cm, identique à celle de la Station 7 (couleurs gris-verdâtre et lie de vin plus ou moins alternées).

- MIRECOURT - STATION 9 (M9) : Sol brun lessivé marmorisé

- Forêt communale de Juvaincourt (Vosges), parcelle 4. Marnes du Sinémurien. Station horizontale. Epicéas de 47 ans.
- La roche-mère, très argileuse, possède, en mélange, 2 couleurs : gris-bleuâtre et rouille.

MIRECOURT - STATION 4 (M4) : SOL LESSIVE

A PSEUDOGLEY

- Forêt particulière surplombant Portieux (Vosges)
- Roche-mère : alluvions quaternaires de la Moselle. Pente assez légère.
- Feulement : Finus sylvestris de 40 ans (semés), Betula alba.
- Végétation secondaire :
 - . Sous-étage : quelques charmes
 - . Semis de Charme, Hêtre, Prunelier, Chêne.
 - . Rubus sp ++ - Cornus sanguinea + - Sambucus nigra - Crataegus monogyna - Festuca ovina ++ - Dactylis glomerata - Hypnum purum + -

PROFIL :

- A₀ : de 0 à + 2 cm - Débris végétaux en décomposition.
- A₁ : de 0 à -10 cm - " brun gris " (E62). Mull peu net ; grumeaux irréguliers à polyédriques de 1 à 10 mm, souvent 3 mm. Poreux. Assez cohérent. Nombreux trous de Lombrics. Cailloux roulés siliceux, environ 35%, surtout de 0,5 à 3 cm. Limite irrégulière.
- A₂ : de -10 à -30 cm - brun jaune (D63), pâle en haut, un peu plus coloré vers le bas. Unités structurales de quelques cm de long, peu nettes, en mélange avec une structure particulière. Nombreux trous de Lombrics. Cailloux roulés : environ 45%. L'enracinement semble assez bon dans cet horizon, plus réduit mais encore net dans les horizons suivants.
- A_{2g} : de -30 à -50 cm - couleur de fond " brun jaune " (E64); taches et concrétions rouilles et noires, rares en haut, plus nombreuses en bas, où le fond lui-même est un peu bariolé brun et jaune. Structure fondue mais ayant tenté à se fragmenter en petites unités informes. Cailloux roulés de dimensions très variables, environ 45%.

- A_{2g}/Bg : de -50 à -80 cm - Couleur de fond " brun vif " (E56), bariolé de rouille et gris de plus en plus nettement vers le bas; nombreuses grosses concrétions noires-violettes. Structure : de polyédrique (1 à 3 cm) très peu net à fondu, mais se fragmentant facilement. Cailloux roulés : en moyenne 15%.
- Bg : à partir de -80 cm. Couleur de fond : jaune rouille, surfaces importantes gris-blanc, souvent verticales; très rouille en bordure des trainées blanches; certaines surfaces presque rouges; nombreuses concrétions noires-violettes, grosses. Structure peu nette, fragmentation en petites unités anguleuses. Environ 50% de cailloux roulés.

- MIRECOURT - STATION 6 (M6) : Sol lessivé à pseudogley

- A proximité de la station 4 : même roche-mère; pente assez légère. Epicéas de 37 ans, semés.
- Profil assez semblable à celui de la station 4, bien que la texture soit en général plus fine (surtout plus de limons; roche-mère hétérogène ?). L'horizon Bg commence à -65 cm.

- MIRECOURT - STATION 2 (M2) : Sol lessivé

- Forêt particulière, 500 m à l'Ouest de la N 429 entre Mattaincourt et Hymont (Vosges). Grès infraliasique. Légère pente. Epicéas de 32 ans.
- Roche-mère hétérogène : de -25 à -50 cm gros cailloux gréseux plus ou moins en décomposition, entre lesquels se trouve l'horizon B; dessous, roche-mère argileuse à deux couleurs : gris-verdâtre et rouille plus ou moins disposées en couches superposées; on peut peut-être supposer que ces couleurs sont dues en partie à l'hydromorphie.

MIRECOURT - STATION 5 (M5) : SOL CALCAIRE VERTISOLIQUE

- Forêt particulière à proximité de la D13 de Contréxéville à Houecourt (Vosges) (à l'ouest de l'embranchement de la route d'Outrancourt). Très légère pente.
- Roche-mère : marnes keupériennes
- Peuplement : Ficea excelsa de 33 ans.
- Végétation secondaire :

. Corylus avellana + - Cornus sanguinea + -

. Hedera helix ++ -

(à proximité dans un taillis sous-futaie, se trouvent : Crataegus monogyna - Acer campestre - Corylus avellana - Ligustrum vulgare - Rosa canina - Convallaria maifalis - Hedera helix).

PROFIL :

- A₀ : de 0 à +1 cm - Feuilles en décomposition.
- A₁ : de 0 à -12 cm - " brun gris très foncé " (J41), très foncé en surface, plus clair vers le bas. Grumeaux polyédriques très nets assez durs, d'environ 4 mm dans la partie supérieure, plus gros (8mm) vers le bas. Très argileux. Assez humide, malgré une longue période de sécheresse. Lombrics. Très enraciné.
- A₁/C' : de -12 à -25 cm - En moyenne " gris foncé " (F81); plus noir vers le haut, plus clair et plus olive vers le bas. Polyèdres de 1 à 3 cm, se fragmentant en polyèdres plus petits, et parfois se soudant en polyèdres supérieurs à 3 cm. Durs. Quelques petits cailloux. Présence d'un peu de roche-mère, en général en très petits fragments à fond gris-brun, avec des taches blanches, rouilles, mauves.

- C' : de -25 à -45 cm - En moyenne, approximativement, " olive " (E82), mais présence de nombreuses autres couleurs : surtout gris, avec des taches mauves, blanches et rouilles; nombreux tous petits cailloux friables blancs et rouilles. Structure surtout fondue, mais aussi polyèdrique, et par endroits lamellaire.
- C : à partir de -45 cm - Très bariolé, avec changements de couleurs sur de toutes petites distances : rouille, gris blanc, mauve, olive. Structure lamellaire, en plaquettes de 1 à 2 mm d'épaisseur, les couleurs étant souvent réparties lamellairement également; ces plaquettes sont soit malléables, soit solides mais souvent friables.

- MIRECOURT - STATION 10 (M10) : Sol calcaire vertisolique

- Vittel, chemin de Norroy (Vosges). marnes Keupériennes.
Fins de 35 ans.
- Profil très semblable à celui de la station 5.

ANNEXE 2

PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

DES SOLS ET ENRACINEMENT

- La texture est représentée par un nombre de 5 chiffres; ces chiffres, dont le total est égal à 10 (ou 9 ou 11) correspondent aux proportions relatives respectivement d'argile, de limons fins, de limons grossiers, de sable fin, de sable grossier. Par exemple, un sol à 30% d'argile, 18% de limons fins, 22% de limons grossiers, 28% de sable fin, 2% de sable grossier, est représenté par le nombre 32230 (cf SANDERS, 1964).

- La densité d'enracinement R correspond aux racines à diamètre 0,75 mm.

- Afin de ne pas confondre le potassium et l'indice K de stabilité structurale, ce dernier sera représenté par Kp.

A. PIN SYLVESTRE

Station	Horizon et Profondeur moyenne (cm)	R	Texture	Argile (%)	d'	ls	Kp	Σ	c - f (%)	hy ₁	hy ₂ (cm)	M.O. (%)	C/N	pH	Calc. actif (%)	Al éch. (l)	Ca (l)	K (l)	T (l)	P ₂ O ₅ ‰	Fer libre ‰	
S8	A1 - 5	15	23130	21	0,99	0,16	36,6	99	13,0	0	0	4,4	15	5,4	0	0,17	9,8	0,43	11,9	0,10	1,46	
	A2 - 30	21	23240	18	1,20	0,79	11,3	77	12,6	0	0	1,0	12	4,9	0	0,36	2,0	0,20	6,6	0,13	1,58	
	B - 55	5	32130	30	1,44	1,61	9,4	70	10,0	2	15	0,4	8	4,9	0	0,60	5,3	0,30	9,1	0,21	3,00	
	B - 75	0	42130	38	1,40	1,50	12,5	73	7,8	2	35	0,4	8	5,4	0	0,23	7,6	0,44	7,4	0,16	1,95	
	C - 95	4	41050	36	1,20	1,70	11,1	71	10,4	0	0	0,4	8	5,3	0	0,63	11,2	0,48	13,9	0,19	2,26	
S9	A1 - 5	7	32230	26	0,98	0,15	55,2	100	7,3	0	0	3,6	13	4,9	0	0	5,6	0,37	11,0	0,11	1,44	
	A2 - 25	20	13230	14	1,30	0,70	10,8	77	13,4	0	0	1,3	9	4,9	0	0,32	2,3	0,33	7,1	0,10	1,13	
	B - 45	1	42220	38	1,34	1,86	6,4	66	7,6	2	11	0,5	9	5,1	0	4,00	5,0	0,48	13,3	0,17	2,26	
	B - 65	7	41130	36	1,42	2,09	5,8	64	7,8	3	31	0,5	7	5,0	0	3,15	8,8	0,44	14,5	0,23	2,64	
	B - 85	0	51120	47	1,27	1,40	9,3	71	9,6	3	49	0,7	8	5,4	0	0,60	20,2	0,46	24,1	0,33	2,82	
A3	A1 - 5	40	24300	23	0,89	0,37	20,6	88	15,0	0	0	3,8	16	5,1	0	0,28	4,9	0,87	10,2	0,10	0,89	
	A2 - 25	3	24300	18	1,10	0,74	15,9	80	15,9	0	0	1,5	13	4,9	0	1,62	2,1	0,58	7,8	0,10	0,84	
	B (Bg) - 50	1	34200	33	1,42	2,45	6,2	63	13,1	1	10	0,9	13	5,1	0	2,85	4,5	0,28	12,0	0,33	1,60	
	Bg - 70	0	43200	36	1,42	1,71	5,7	65,5	11,7	2	30	0,5	8	5,1	0	3,67	8,6	0,50	13,6	0,34	1,11	
	Bg - 105	1	53100	45	1,53	2,02	3,1	58,5	10,9	5	65	0,6	7	5,1	0	3,64	14,6	0,47	17,0	0,33	1,60	
A4	A1 - 5	60	24300	21	0,96	0,21	18,9	91	13,3	0	0	4,6	16	5,1	0	0,24	7,4	0,34	12,0	0,18	0,87	
	A2g - 20	13	25100	17	1,15	1,27	6,1	68	16,3	1	9	1,1	11	5,2	0	1,11	4,0	0,66	7,0	0,13	0,84	
	A2g, Bg - 35	9	24201	21	1,36	2,04	5,0	63	12,3	2	24	0,7	10	5,1	0	1,83	3,2	0,28	7,8	0,17	1,04	
	Bg - 55	6	43200	44	1,54	1,72	4,0	62	10,6	5	44	0,3	6	4,9	0	4,20	9,2	0,38	16,0	0,29	1,79	
	Sa 1	A1 - 5	50	11043	10	0,66	0,09	58,1	100	3,9	0	0	12,9	22	4,4	0	2,08	1,7	0,66	15,8	0,07	0,29
A1, A2 - 20		10	10053	10	1,18	0,07	66,6	100	9,4	0	0	2,1	21	4,5	0	1,26	0,1	0,19	5,0	0,04	0,35	
A2 - 35		16	11053	9	1,34	0,15	47,7	100	7,4	0	0	0,5	14	4,7	0	0,93	0,2	0,11	1,8	0,04	0,34	
A2 - 55		19	11053	6	1,48	0,42	43,6	93,5	8,0	0	0	0,3	9	4,6	0	0,85	0,3	0,15	1,7	0,04	0,25	
Bg - 80		0	01154	3	1,47	0,58	8,4	76,5	8,8	3	20	0,1	5	4,6	0	0,34	0,2	0,12	0,9	0,03	0,47	
B'g - 100	0	10053	9	1,61	0,80	10,8	76,5	8,5	5	40	0,1	2	4,4	0	0,78	0,3	0,12	2,4	0,05	0,25		
Sa 2	A1 - 3	80	11143	10	0,06	0,06	77,9	100	0,2	0	0	8,4	21	5,9	0	0	7,6	1,80	0,08	0,30	0,30	
	A1, A2 - 20	28	11143	7	1,22	0,09	48,3	100	9,8	0	0	1,7	12	5,4	0	0,28	1,4	0,62	4,0	0,06	0,23	
	A2 - 45	21	11143	8	1,33	0,31	23,5	90,5	11,0	0	0	0,8	12	4,8	0	0,36	0,4	0,13	2,4	0,09	0,40	
	Bg - 80	7	11143	9	1,64	2,59	4,4	60	11,0	3	15	0,5	9	4,6	0	1,28	0,7	0,12	3,7	0,09	0,53	
	B'g - 105	7	11143	12	1,64	2,65	3,0	56,5	12,0	5	40	0,4	5	4,4	0	2,14	0,7	0,12	3,3	0,05	0,34	
Sa 4	A1 - 5	15	11143	8	0,98	0,18	47,4	100	2,0	0	0	9,7	19	4,2	0	1,33	2,2	0,29	13,7	0,06	0,20	
	A2 - 25	10	11143	6	1,10	0,13	42,0	100	10,9	1	7	1,3	16	4,6	0	1,23	0,1	0,27	3,7	0,18	0,16	
	A2g - 50	7	11143	9	1,37	0,45	22,5	87	10,2	2	32	0,6	9	4,6	0	0,69	0,1	0,13	1,7	0,23	0,25	
	Bg - 85	8	11143	8	1,68	1,75	5,1	64	10,9	5	67	0,1	1	5,0	0	1,58	0,1	0,08	2,2	0,06	0,32	
	V1	A1 - 5	42	52110	49	0,94	0,42	6,3	76,5	13,0	0	0	5,4	13	7,2	5,75	0,18	1,50	35,3	0,15	1,78	
(B) - 25		27	61110	60	1,18	0,74	4,9	70	13,2	0	0	1,2	9	7,1	2,1	0,32	0,86	27,8	0,05	0,82		
(B) C - 58		8	52110	51	1,07	0,1	5,1	68	14,3	0	0	0,5	9	7,9	9,1	0,57	0,56	32,6	0,06	1,18		
V2		A1 - 5	47	52112	49	0,95	0,19	77,0	100	7,4	0	0	6,0	12	7,8	14,5	0,33	1,08	36,0	0,06	1,17	
		(B) - 25	11	52111	45	1,38	0,77	5,1	70	9,3	0	0	1,9	16	8,1	19,1	0,44	0,87	28,4	0,02	1,69	
C - 50	5	51103	49	1,10	6,5	68,5	10,7	0	0	0	0,8	15	8,2	14,8	0,21	0,38	21,0	0,02	1,55			
V5	A1 - 5	16	42112	38	0,06	0,06	111,0	100	3,4	0	0	6,8	12	7,8	14,3	0,29	1,30	31,2	0,02	0,54		
	(B) - 30	1	70112	65	0,31	32,1	93	8,3	0	0	0	1,9	7	8,0	9,1	0,47	0,67	31,4	0,04	0,98		
	(B) C - 97	8	32113	26	0,39	70,7	98	11,5	0	0	0	0,9	8	8,5	21,3	0,54	0,14	14,3	0,01	0,24		
	V7	A1 - 5	60	16110	11	0,29	8,3	81,5	12,5	0	0	0	8,9	16	7,8	9,5	0,33	2,40	38,2	0,19	1,11	
		(H) - 30	4	43111	43	1,04	2,3	60,5	10,4	0	0	0	0,9	8	8,0	17,0	0,53	0,60	23,2	0,05	0,74	
V9	A1 - 10	23	32112	25	0,07	146,0	100	5,9	0	0	0	4,3	10	8,0	17,3	0,26	0,49	23,0	0,16	0,59		
	(B) - 30	15	22212	20	0,20	90,1	100	9,3	0	0	0	1,9	9	8,2	21,9	0,35	0,19	16,6	0,01	0,37		
	D1	A2 - 3	48	22114	16	1,04	0,15	50,0	100	11,7	0	0	2,1	20	4,5	0	2,32	0,08	0,09	6,4	0,03	0,67
		A2 - 35	22	12114	15	1,22	0,68	26,9	86	11,1	0	0	0,9	13	4,7	0	1,60	0,25	0,11	4,4	0,14	0,88
		Bg - 90	4	21115	21	1,46	0,95	7,8	72	7,0	2	10	0,1	6	4,6	0	2,72	0,44	1,7	4,8	0,07	1,13
B'g - 73		8	22114	18	1,49	0,73	10,2	76,5	11,4	3	33	0,2	7	4,8	0	1,82	0,89	0,41	4,4	0,21	0,59	
B''g - 105		0	30015	26	0,95	8,1	73	6,1	6	65	0,1	5	4,8	0	5,10	0,38	0,15	6,4	0,06	0,84		
D2	A1, A2g - 15	36	22114	19	0,92	0,13	52,4	100	10,8	1	0	3,5	18	5,1	0	2,94	0,63	0,13	9,8	0,13	0,60	
	A2g - 32	18	12114	15	1,17	0,76	12,4	78	10,4	1	0	0,6	12	4,6	0	1,86	0,38	0,07	4,6	0,10	0,64	
	B - 45	16	22114	22	1,42	0,69	9,9	70	11,2	2	10	0,3	8	4,8	0	3,42	0,25	0,11	6,0	0,07	1,08	
	B'g - 76	16	22113	24	1,41	0,83	5,5	70	8,9	4	61	0,5	7	4,7	0	3,47	0,25	0,11	7,2	0,05	1,02	
	B''g - 100	9	21114	22	1,20	6,4	69	7,8	5	85	0,1	10	5,1	0	4,08	0,44	0,10	7,0	0,07	1,14		
D3	(B) - 15	21	11026	6	1,14	0,13	147,0	100	7,3	0	0	1,8	21	4,9	0	0,92	0,05	0,10	3,6	0,06	0,20	
	(B) - 45	32	11026	7	1,23	0,22	46,2	98,5	7,4	0	0	0,8	10	4,8	0	0,90	0,07	0,04	2,6	0,05	0,22	
	(B) C - 65	30	11025	7	1,34	0,32	34,8	93	7,7	0	0	0,8	15	4,7	0	0,99	0,16	0,15	2,2	0,04	0,20	
	D4	A1 - 20	25	01126	5	1,29	0,19	93,0	100	7,1	0	0	0,9	10	4,6	0	0,96	0,39	0,09	3,6	0,03	0,18
		(B) - 50	22	11125	8	1,41	0,47	35,6	91	7,2	0	0	0,7	14	5,1	0	1,05	0,28	0,12	1,8	0,06	0,15
(B) - 76	15	11126	7	1,45	0,64	11,2	78	7,8	0	0	0,5	11	5,6	0	0,62	0,55	0,09	2,8	0,03	0,14		
D5	A1 - 5	66	10017	11	1,06	0,19	183,0	100	5,8	0	0	2,7	26	4,1	0	0,26	0,31	0,09	4,8	0,06	0,12	
	A2 - 20	38	11018	8	1,16	0,16	141,0	100	6,1	0	0	0,6	12	4,6	0	0,46	0,13	0,04	4,6	0,06	0,02	
	A2 - 35	30	11008	6	1,22	0,24	167,0	100	6,5	0	0	0,4	8	4,8	0	0,50	0,13	0,02	8,0	0,05	0,05	
	B2 - 68	22	10018	12	1,08	0,38	47,9	95	4,3	0	0	0,4	12	4,8	0	1,26	0,13	0,06	2,2	0,04	0,28	
	C - 110	24	00018	5	0,45	14,0	83	5,1	0	0	0	0,1	10	5,1	0	0,81	0,25	0,07	2,2	0,08	0,09	
D6	A1 - 5	100	11124	10	0,81	0,34	35,6	93	11,1	0	0	9,25	23	3,9	0	1,04	0,73	0,22	12,6	0,03	0,04	
	A2 - 20	8	12116	9	1,25	2,1	58,5	10,6	0	0	0	0,9	18	5								

(1) en m.e. / 100 g.

Station	Horizon et Profondeur (cm)	R	Texture	orgite (%)	d'	ls	Kp	Σ	1-1 (%)	hy ₁	hy ₂ (cm)	M.O. (%)	C/N	pH	Calc. actif (%)	Al éch. (1)	Ca (1)	K (1)	T (1)	P ₂ O ₅ (%)	Fer libre (%)
S1	A1 - 5	50	23220	20	0.87	0.10	64.7	100	6.4	0	0	4.9	17	4.5	0	0.10	5.3	0.29	13.9	0.12	1.15
	A2 - 15	50	23220	23	1.19	0.46	17.0	85	13.0	0	0	1.9	12	4.6	0	1.25	1.8	0.19	9.1	0.13	1.25
	B - 45	20	42220	38	1.33	1.50	6.9	68	8.5	2	10	0.5	8	5.0	0	2.22	11.2	0.18	14.1	0.18	1.85
S2	A1 - 24	18	23230	23	1.06	0.56	22.5	85	5.4	0	0	2.3	12	5.0	0	0.41	2.3	0.25	8.7	0.22	1.62
	B - 4	7	42220	31	1.27	1.95	7.6	67	11.2	0	0	0.5	6	5.0	0	2.06	7.5	0.42	12.3	0.21	2.00
	B - 6	7	42130	38	1.4	1.66	7.6	68	10.4	0	0	0.5	10	5.1	0	0.74	13.0	0.43	14.9	0.22	3.04
S3	A1 - 15	33	23230	15	1.1	0.56	22.6	86	11.6	0	0	1.9	12	4.7	0	1.11	1.5	0.18	7.3	0.23	1.37
	A2 - 29	26	23230	26	1.25	1.42	12.6	84	11.3	0	0	0.7	10	4.7	0	1.05	1.8	0.21	7.9	0.69	1.57
	B - 45	9	42220	29	1.30	1.40	8.0	68	9.0	0	0	0.6	7	3.9	0	2.76	4.3	0.30	10.5	0.30	1.81
S4	A1 - 5	20	22131	24	1.02	0.06	27.0	100	6.0	0	0	5.4	14	5.5	0	0.33	16.2	0.56	19.6	1.42	3.08
	A2 - 20	20	13132	12	1.14	0.82	11.2	77	9.1	0	0	1.9	11	5.3	0	0.56	8.4	0.23	15.3	1.50	3.72
	B - 45	20	22131	24	1.30	0.94	3.9	61	8.0	0	0	1.0	9	5.3	0	0.41	9.2	0.21	12.7	1.29	2.98
S5	A1 - 8	08	42220	21	1.48	2.11	5.2	63	8.0	0	0	0.7	8	5.6	0	0.27	8.4	0.23	12.3	1.28	3.06
	B - 60	17	22220	24	1.08	0.63	16.5	82	12.8	0	0	0.5	8	5.6	0	0.24	9.8	0.16	11.1	1.26	2.78
	C - 60	17	22220	24	1.08	0.63	16.5	82	12.8	0	0	0.5	8	5.6	0	0.24	9.8	0.16	11.1	1.26	2.78
S6	A1 - 5	18	42220	20	0.28	0.07	42.5	100	3.0	0	0	5.7	13	5.5	0	0	14.4	0.42	19.7	1.56	2.26
	A2 - 28	28	22220	20	0.86	0.21	58.0	97	6.6	0	0	1.3	11	5.9	0	0	15.6	0.18	17.6	1.20	2.84
	B - 45	18	42220	24	0.87	1.35	53.2	100	8.8	1	0	4.4	14	5.0	0	0.15	7.0	0.77	13.8	0.10	1.18
S7	A1 - 20	40	24300	16	1.02	0.04	7.5	75	15.1	2	15	1.9	14	5.0	0	1.50	2.5	0.29	8.5	0.08	1.22
	A2 - 40	23	34200	32	1.34	1.35	5.8	65	11.0	3	40	0.7	10	5.5	0	4.35	4.4	0.50	11.6	0.26	1.52
	B - 65	15	42200	37	1.36	1.44	7.0	68.5	8.7	4	60	0.6	9	5.4	0	4.97	7.0	0.42	15.2	0.21	1.53
S8	A1 - 85	15	42200	43	1.42	1.32	8.2	70	8.5	4	80	0.5	11	5.5	0	4.38	11.8	0.40	18.4	0.19	1.86
	B - 100	8	53100	57	1.43	1.69	6.8	67	10.1	4	100	0.6	9	5.4	0	2.93	11.0	0.25	20.1	0.32	2.18
	C - 100	8	53100	57	1.43	1.69	6.8	67	10.1	4	100	0.6	9	5.4	0	2.93	11.0	0.25	20.1	0.32	2.18
S9	A1 - 5	70	42200	37	1.18	0.49	48.8	85	12.7	1	10	2.6	13	5.0	0	2.07	1.7	0.23	12.2	0.32	1.47
	A2 - 45	48	42200	36	1.17	0.44	16.7	80	11.2	1	25	1.3	11	5.4	0	6.96	3.1	0.58	14.1	0.22	1.98
	B - 50	30	72100	68	1.14	1.45	10.8	72	9.3	2	40	0.8	9	4.8	0	12.1	7.2	0.63	21.6	0.04	2.68
S10	A1 - 58	20	61000	60	1.27	1.84	8.7	68.5	12.5	3	53	0.5	11	4.6	0	9.1	8.6	0.68	22.4	0.01	1.88
	B - 65	22	63100	56	1.33	2.22	4.0	59	11.6	4	70	0.5	11	4.6	0	9.2	10.0	0.63	21.2	0.04	1.96
	C - 100	8	63100	57	1.19	1.68	2.0	50.5	11.1	4	90	0.5	8	4.7	0	6.5	12.9	0.45	20.2	0.07	1.37
S11	A1 - 5	100	11004	12	0.14	0.14	45.4	100	7.2	0	0	8.3	28	4.0	0	2.12	1.05	0.15	15.0	0.12	0.35
	A2 - 80	84	11184	6	0.23	0.13	40.0	100	9.7	0	0	1.3	11	4.5	0	0.54	0.18	0.15	2.8	0.10	0.18
	B - 80	68	11184	7	0.27	0.27	26.2	92	10.3	0	0	0.5	11	4.4	0	0.65	0.18	0.17	1.8	0.08	0.17
S12	A1 - 80	6	00054	3	1.52	0.46	7.3	77	9.2	2	15	0.3	6	4.6	0	0.33	0.11	0.10	1.0	0.04	0.18
	B - 80	6	00054	3	1.52	0.46	7.3	77	9.2	2	15	0.3	6	4.6	0	0.33	0.11	0.10	1.0	0.04	0.18
	C - 80	6	00054	3	1.52	0.46	7.3	77	9.2	2	15	0.3	6	4.6	0	0.33	0.11	0.10	1.0	0.04	0.18
S13	A1 - 5	160	11134	12	0.15	0.15	41.3	100	6.6	0	0	7.6	21	4.1	0	0.28	0.63	0.20	12.0	0.12	0.32
	A2 - 20	64	01134	3	1.01	0.16	52.8	100	10.5	0	0	1.4	12	4.5	0	1.19	0.08	0.13	4.2	0.11	0.19
	B - 45	28	01036	3	1.18	0.42	21.9	89.5	11.1	0	6	0.8	12	4.6	0	0.60	0.08	0.11	1.7	0.06	0.28
S14	A1 - 55	34	01026	2	0.36	0.36	19.9	88	10.1	0	0	0.5	12	4.6	0	0.54	0.13	0.12	1.3	0.25	0.19
	B - 90	3	00009	0	1.70	0.36	177.0	1.8	1	20	0.3	4	4.8	0	0.08	0.08	0.07	9.7	0.01	0.05	
	C - 90	3	00009	0	1.70	0.36	177.0	1.8	1	20	0.3	4	4.8	0	0.08	0.08	0.07	9.7	0.01	0.05	
S15	A1 - 5	82	11133	13	0.83	0.18	18.2	98	6.5	0	0	9.5	15	4.1	0	1.19	1.21	0.37	14.8	0.07	0.19
	A2 - 25	19	11143	12	1.06	0.09	54.8	100	11.1	0	0	2.9	15	4.1	0	1.03	0.30	0.13	4.8	0.07	0.34
	B - 40	18	11143	7	1.25	0.25	26.9	93	11.4	0	0	0.5	11	4.6	0	0.86	0.44	0.06	2.4	0.13	0.21
S16	A1 - 52	7	11143	7	1.30	0.55	16.4	83	10.5	0	0	0.5	9	4.4	0	0.96	0.25	0.06	2.0	0.08	0.19
	B - 75	10	11143	13	1.34	1.41	5.4	66	9.0	2	15	0.2	14	4.5	0	1.34	0.86	0.42	2.1	0.05	0.58
	B - 105	6	10062	10	1.71	1.55	6.0	66.5	9.5	4	45	0.2	5	4.5	0	1.41	0.36	0.33	2.3	0.08	1.08
S17	A1 - 5	86	52110	54	0.94	0.23	25.8	93.0	8.8	0	0	5.9	14	6.6	0	0.12	35.7	1.10	36	0.10	1.17
	B - 27	64	61120	57	1.16	0.68	8.0	75	10.3	0	0	1.8	8	7.6	2.0	0.30	0.72	0.36	0.08	1.45	
	C - 40	16	51120	52	0.68	0.68	8.0	75	10.3	0	0	1.2	8	7.8	3.1	0.33	0.65	0.36	0.02	1.34	
S18	A1 - 5	60	52111	49	0.88	0.13	85.3	100	6.2	0	0	6.8	12	7.7	15.8	0.38	1.65	38.2	0.05	1.51	
	B - 30	33	42111	45	1.18	0.53	6.5	75	7.9	0	0	2.3	10	8.0	15.3	0.35	0.92	20.7	0.02	1.63	
	C - 40	24	52111	49	1.24	0.58	6.0	74	12.3	0	0	1.7	9	7.9	4.8	0.35	0.72	36.0	0.01	1.58	
S19	A1 - 70	19	52110	54	0.88	0.69	6.9	72	10.6	0	0	0.9	9	7.9	14.3	0.60	0.76	34.6	0.02	1.46	
	B - 70	19	52110	54	0.88	0.69	6.9	72	10.6	0	0	0.9	9	7.9	14.3	0.60	0.76	34.6	0.02	1.46	
	C - 70	19	52110	54	0.88	0.69	6.9	72	10.6	0	0	0.9	9	7.9	14.3	0.60	0.76	34.6	0.02	1.46	
S20	A1 - 5	85	52112	34	0.07	536.0	100	4.7	0	0	6.5	12	7.								

BIBLIOGRAPHIE

- BALAZS F., 1961 - (Investigations on controlled changes in root development).
Kiserl.Közlem. 54 A, (3), 97-113
- BALDY Ch., 1963 - Cultures associées et productivité de l'eau.
Annls.agron., 14, (4), 489-534
- BERNOT J., 1965 - Contribution à l'étude des sols lessivés des terrasses de la Garonne.
Annls. de l'Ec.Nat. Sup.Agron. de TOULOUSE, tome X, 3-107
- BETHLAMMY N., 1963 - Soil - moisture sampling variation as affected by vegetation and depth of sampling.
Soil Sci., 95, (3), 211-213
- BIBELRIETHER H., 1962 - (Investigations on the roots of silver fir and oak in central Swalia).
Forstw.Cent. Bl., 81, (7/8), 230-248
- BIBELRIETHER H., 1963 - (le développement des racines de Finus sylvestris sur sable et sur pseudogley).
Fortsw.Cent Bl., 82, (5/6), 139-146
- BLANCHET R., 1956 - Quelques aspects de l'absorption des éléments fertilisants et de leur utilisation à la croissance de la plante.
VIè Cong.int.Sci.du Sol, IV, 19, Vol.D, 119-130
- BLANCHET R., CHAUMONT C., 1964 - Quelques aspects de la désorption et des mouvements d'ions phosphoriques dans le sol et de leur participation à l'alimentation des plants.
Annls agron., 15, (5), 519-538
- BLANCHET R., CHAUMONT C., STUDER R., 1962 - Alimentation phosphorique des plantes et phénomènes de contact racines particules de sol.
Annls agron., 13, (1), 21-29
- BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C., 1962 - Quelques aspects des interactions entre l'alimentation potassique et l'alimentation hydrique des plantes.
Annls agron., 13, (2), 93-110

- BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C., 1962 - Propriétés physico-chimiques des sols et alimentation potassique des plantes.
Annls agron., 13, (3), 175-201
- BONNEAU M., 1961 - Evaluation au laboratoire de la capacité au champ en fonction de la texture .
Bull.A.F.E.S., n° spécial (8), 16-26
- BONNEAU M., 1963 - L'importance des propriétés physiques du sol dans la production forestière.
Rev.For.Franc., (1), 19-31
- BONNEAU M., DUCHAUFOR Ph., 1960 - Méthode de descriptions des profils de sols .
Stat.Rech. et Exp.For., Nancy, n° 6, 4 p.
- BOUCHET R.J., 1963 - Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole.
Annls agron., 14, (5), 743-824
- BOUREAU E., 1954, 1956, 1957 - Anatomie végétale.
Presse univ.de France, Paris, 3 tomes, 752 p.
- BROADFOOT W.M., BURKE H.D., 1958 - Soil-moisture constants and their variation. Southern Forest Exp. Stat., Forest Serv., U.S. Depart.
Of Agric., occasionnel paper 166, 27 p.
- CAILLEUX A., TAYLOR G., 1958 - Code expolaire.
Edit.Boubée, Paris
- CAMEFORT H., FANIEL J., 1962 - Morphologie et anatomie des végétaux vasculaires.
G.Doin et Cie, Paris, 371 p.
- COMBEAU A., 1960 - Observations sur certains facteurs de la rétention d'eau par le sol pour diverses valeurs remarquables du pF. Application à quelques types de sols tropicaux.
Inst.d'enseign. et de Rech.trop., Bondy, 22 p.
- COMBEAU A., QUANTIN P., 1963 - Observations sur la capacité au champ de quelques sols ferrallitiques. Rapprochement avec les courbes pF.-humidité.
Sci. du Sol, (1), 5-12
- COMBEAU A., MONNIER G., 1961 - Méthode d'étude de la stabilité structurale. Application aux sols tropicaux.
Sols afr., 6, (1), 4-32

- COX C.S., 1959 - Root distribution in Ponderosa Pine stands growing on three soils.
Bull.Sch.For mont. St. Univ., 18, 7 p.
- DAY W.R., 1962 - Notes on the development of the root system with Sitka Spruce.
Scot.For, 16, (2), 72-83
- DE ROO H.C., 1961 - Deep tillage and root growth. A study of tobacco growing in sandy loam soil.
The Connecticut agric.Exp.Stat., 644, 48 p.
- DUCHAUFOR Ph., 1953 - Régénération de l'Epicéa et Pédologie.
Rev.For.Franç., (4), 257-269
- DUCHAUFOR Ph., 1957 - Pédologie. Tableaux descriptifs et analytiques des sols.
Ecole Nat.Eaux et Forêts, Nancy, 87 p.
- DUCHAUFOR Ph., 1965 - Précis de Pédologie.
Masson et Cie, Paris, 481 p.
- EHWALD E., GRUNERT F., SCHULZ W., VETTERLEIN E., 1961 -
Zur Ökologie von Kiefern - Buchen (-mischbeständen).
Arch.Forstw., 10 (4-6), 397-416
- EVERS F.H., 1966 - Einige grundlagne und probleme der forstdüngung.
Allg.Forstz., 15/16, 252
- FAYLE D.C.F., 1965 - Rooting habit of sugar maple and yellow birch -
Departm.of forestry, Canada, public.
N° 1120, 31 p.
- FEHRENBACHER J.B., JOHNSON F.R., ODELL R.T., et Al, 1960 -
Root penetration and development of some farm crops as related to soil physical and chemical properties.
Trans. 7 th int. Congr.
Soil Sci., 3, 243-252
- FIEDLER H.J., HUNGER W., ZANT R., 1963 - Untersuchungen über die Bodendurchwurzelung der Fichte.
Arch.Forstw., 12, (11), 1214
- FOX R.L., LIPFS R.C., 1960 - Distribution and activity of roots in relation to soil properties.
Trans 7 th int. Congr. Soil Sci., 3, 260-267

- GILBERTSON R.L. , LEAPHART C.D. , JOHNSON F.D. , 1961 - Field identification of roots of conifers in the inland empire. For Sci. , 7, (4), 352-356
- GIULIMONDI G. , 1962 - Effect of humic acid on the rooting and growth of poplars and eucalyptus. Proc. 13 th Cong. int. Un. For. , Res. Organ. Ft. 2, (1), Sect. 23/6, 7 p.
- GRAS R. , 1961 - Relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pommier dans la Sarthe. Annls agron. , 12, (2), 207-248
- GRAS R. , 1962 - Quelques observations sur les relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pêcher dans la vallée du Rhône, entre Vienne et Valence. Annls agron. , 13, (2), 141-174
- GRAS R. , 1965 - Premiers résultats d'un essai d'entretien du sol en arboriculture fruitière. 1. Action sur les propriétés physiques du sol. Annls. agron. , 16, (6), 663-700
- GRAS R. , MONNIER G. , 1962 - Contribution des cailloux à la capacité de réserve en eau du sol. C.R.Ac.Sci. , 254, 3422-3424
- GRAS R. , MONNIER G. , 1963 - Contribution de certains éléments grossiers du sol à l'alimentation en eau des végétaux. Sci.Sol, (1), 13-20
- HALLAIRE M. , 1961 - Irrigation et utilisation des réserves naturelles. Annls agron. , 12, (1), 87-97
- HALLAIRE M. , 1963 - Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement. Annls agron. , 14, (4), 393-428
- HENIN S. , FEODOROFF A. , GRAS R. , MONNIER G. , 1960 - Le profil cultural - Principes de physique du sol. 320 p. , Soc. d'éditions des ing.agric. , Paris
- HENIN S. , GRAS R. , 1962 - Vigueur des arbres fruitiers et épaisseur de sol exploitée par les racines. C.R.Ac. Sc. , 255, 1775-1777
- HENIN S. , MONNIER G. , COMBEAU A. , 1958 - Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. Annls agron. , 1, 71-90

- HESLOP R.E.F., 1959 - Root and shoot development of scots pine.
Arbor, Aberd, 3, (3), 4-5
- HIDDING A.F., VAN DEN BERG C., 1960 - The relation between pore volume and the formation of root systems in soils with sand layers. Trans 7 th int.congr.
Soil Sci., 1, 369-373
- HOCHTANNER G., SEITSCHER O., 1964 - Wuchsleistungen von Kiefernbeständen auf meliorierungsflächen nach den bodenwörter Verfahren.
Forstw. Cent Bl., 83, (1-2), 1-23
- HOFFMANN G., 1966 - Verlauf der Tiefendurchwurzelung und Feinwurzelbildung bei einigen Baumarten.
Arch.Forstw., 15, (8), 825-856
- HOLSTENER-JØRGENSEN H., 1958 - Physical soil-investigations in danish Beech-stands Det forstlige Forsgsvaesen i Danmark, 25, 93-223
- HOLSTENER-JØRGENSEN H., 1959 - Investigation of root systems of Oak, Beech and Norway Spruce on groundwater - affected moraine soils with a contribution to elucidation of evapotranspiration of stands. Det forstlige.
Forsgsvaesen i Danmark, 25, 225-289
- HOLSTENER-JØRGENSEN H., 1961 - An investigation of the influences of various treespecies and the ages of the stands on the level of the groundwater table in forest tree stands at Bregentved.
Det forstlige Forsgsvaesen i Danmark, 27, 233-480
- HORTON J.W., 1958 - Rooting habits of lodgepole pine Tech.Note, Forest Res. Div., Ottawa, 67, 3-26
- JARVIS F.G., JARVIS M.S., 1963 - The water relations of tree seedlings.
Physiologia Pl., 16, 215-235 et 269-275
- JUNG J., RIEHLE G., 1966 - Blatt und nadelanalytische auswertungen bei mehr jährigen düngungsversuchen mit fortpflanzen in gefässen.
Forstw.Cent Bl., 85, (9/10), 295-305
- JUSTE C., 1964 - Influence du chaulage sur la phytotoxicité de l'aluminium mobile d'un sol de défriche riche en colloïdes minéraux.
Annls agron., 15, (1), 5-22

- KALELA E.K., 1950 - On the horizontal roots in Pine and Spruce Stand 1.
Acta forest.
Fennica, 57, (2), 79 p.
- KAUFMAN C.M., 1945 - Root growth of jackpine on several sites in cloquet forest Minnesota.
Ecologie 26, 10-23
- KERN K.G., MOLL W., BRAUN H.J., 1961 - Wurzel untersuchungen in Rein - und Mischbeständen des Hochschwarzwaldes.
Allg.Forst.u. Jagdztg, 132, (10), 241-260
- KMOCH H.G., 1960 - Die Herstellung von Wurzelprofilen mit Hilfe des Utach - Erdbohrers und ihre Ausdeutung.
Z. Acker - u. Pflbau, 110, 249-254 et 425-437
- KORSTIAN T., COILE W.S., 1938 - Plant competition in forest stands.
Duke univ. School Forestry Bull. n° 3
- KÖSTLER J.N., 1956 - Waldbauliche Beobachtungen an Wurzelstöcken sturmge - Worfenen Nadelbäume.
Forstws. Cent Bl., 3/4, 65-91
- KÖSTLER J.N., 1962 - Untersuchungen zur Wurzelbildung .
Allg. Forstz., 17, (28), 413-417
- KOWALKOWSKI A., CZARNOGA K., 1962 - Recherches sur l'enracinement du chêne, du Hêtre, du Pin et de l'Epicéa dans les sols du district forestier de Debina (en polonais).
Soil. Sci. annual (Varsovie), 12, 237-255
- KRAMER F.J., 1956 - Roots as absorbing organs
in Encyclopedia of plant physiology, 3, 188-214
Springer Verlag, Berlin
- KREUTZER K., 1961 - Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudogley-böden.
Forstws. Cent Bl., 80, (11-12), 356-392
- KURAMOTO M., NAGAOKE T., SANADA M., 1961, 1962 - Studies of nutrient contents and root systems of 4 - 12 year Todo Fir.
Ann.Rep.For.Exp. Sta., HOKKAIDO, 43 - 2
- LEIBUNDGUT H., DAVIS S., 1961 - Die periodizität des Wurzelwachstums von Larchen Verschiedenen Herkunft.
Verband forstl. Forschungsanstalten, 13. Kongress
Wien, 2è teil, Bd 1, 23-2, 4 p.

- LEIBUNDGUT H., DAFIS Sp., RICHARD F., 1963 - Untersuchungen über das Wurzel Wachstum verschiedener Baumarten.
Journal For Suisse, 11, 621-646
- LEIBUNDGUT H., 1964 - The effect of *Nardus stricta* and *vaccinium myrtillus* on the establishment of scots pine and European Larch. Investigations on root competition n° 2.
Schweiz Z. Forstwes, 115, (5), 331-336
- LEIBUNDGUT H., DAFIS Sp., 1964 - Untersuchungen über das Wurzelwachstum verschiedener Baumarten.
Journal For Suisse, 115, (8), 444-450
- LEYTON L., ROUSSEAU L.Z., 1958 - Root growth of tree seedlings in relation to aeration.
The Physiology of forest trees, 23, 467-475
- MAC MINN (R.G., 1963 - Characteristics of Douglas - fir root systems
Can J.Bot 41, (1), 105-122
- MAC QUEEN D.R., 1966 - La répartition quantitative des racines absorbantes de Pin sylvestre et de Hêtre d'une série évolutive naturelle en margeride (Massif Central), 163 p., Centre d'études phytosociologiques et écologiques, Montpellier.
- MAERTENS C., 1964 - Influence des propriétés physiques des sols sur le développement racinaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures.
Sci. Sol, 1er semestre, 31-42
- MAERTENS C., 1964 - La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement.
Annls agron., 15, (5), 539-554
- MELZER E.W., 1964 - Die Wurzel Ausbildung der Holzarten auf den meliorierten Standorten der oberforsterei Adorf (Vogtland)
Arch.Forstw., 13, (4), 407-438
- MELZER E.W., 1964 - Bodenaufschluss und Wurzel Ausbildung der Holzarten auf nicht meliorierten Standorten der Oberforsterei Adorf (Vogtland)
Arch.Forstw., 13, (5)
- MELZER E.W., 1964 - Vergleich der Wurzel Ausbildung zwischen meliorierten und nicht meliorierten Standorten der Oberforsterei Adorf (Vogtland).
Arch. Forstw., 13, (6), 615-625

- MERIAUX S., 1954 - Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique.
Annls agron., n° 1 et 2, 118 p.
- MERIAUX S., 1957 - L'analyse granulométrique par densimétrie.
Bull. Ass. fr. Etude Sol, 90, 928-941
- MOREAU F., 1960 - Botanique - Encyclopédie de la Flore,
Gallimard, Paris, 1531 p.
- MUELLER O.P., CLINE M.G., 1959 - Effects of mechanical soil barriers
and soil wetness on rooting of trees and soil - mixing
by blow - down in Central New-York
Soil Sci., 88, 107-111
- NEBE W., 1962 - Zum Ernährungszustand älterer Fichtenbestände der
Ostgebirges Tagber .
Dt. Akad. Landw Wiss. Berl., 50, 27-29
- FAAVILAINEN, 1966 - On the effect of drainage on root systems of scots
pine on peat soils.
Commun. Inst. For. Fern., 61
- PATT J., CARMELI D., ZAFRYR I., 1966 - Influence of soil physical
conditions on root development and on productivity of
Citrus trees.
Soil Sci., 102, (2), 82-84
- PERIGAUD S., 1965 - Action de la résistance mécanique et du manque
d'oxygène sur le développement des racines.
C.R. Ac. Agr., 51, 1209-, 220
- RADUK A.F., 1964 - (Development of the Apple-tree root system within
the profiles of three soil grounds.
J. Cf. Sov. Soil Sci., (2), 79-82
- SANDERS K.B., 1964 - A simple ratio scheme for expressing particle
size distribution in soils.
Soils Sci., 92, (5), 300-301
- SCHURMAN J.J., GOEDEWAGEN M.A.J., - Growth and root development
of spring wheat on various loam profiles.
Trans. 6 th int. Cong. Soil Sci., 325-334
- SCHURMAN J.J., GOEDEWAAGEN M.A.J., 1964 - Methods for the
examination of root systems and roots.
86 p. Centre for agricultural publications and documen-
tation, Wageningen.

- SCHWARTZ D., 1963 - Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes.
290 p. Editions médicales Flammarion, Paris
- SLAVIKOVA J., 1950 - Einfluss der Buche als edifikator auf die entwicklung der krantschicht in Buchenphytozoenosen.
Preslia 30, 19-42
- STUDER R., 1961 - Méthode de détermination des réserves hydriques des sols.
Annls agron., 12, (6), 599-608
- SUZAKI T., SANEMATSU H., 1962 - A fundamental study on the tree root -the root survey on the young Sugi trees (cryptomeria japonica D.Don) applied some treatments -
Reports of the Kyushu university forests, n° 17, 9-37
- SZONYI L. - Die Standorts Verhältnisse der einheimischen Douglasienbestände - Inst. f. Forstw., Budapest, Cahier XXII, n° 1-2, 92 p.
- TAYLOR H.M., GARDNER H.R., 1963 - Penetration of cotton seedling tap roots as influenced by bulk density moisture content and strength of soil.
Soil Sci., 96, (3), 153-156
- TAYLOR H.M., BURNETT E., 1964 - Influence of soil strength on the root - growth habits of plants.
Soil Sci., 98, (3), 174-180
- TAYLOR H.M., ROBERSON G.M., PARKER J.J., 1966 - Soil strength - root penetration relations for medium to coarse - textured Soil materials. Soil Sci., 102, (1), 18-22
- TOMASSONE R., 1965 - Analyse de régression progressive.
8 p. C.N.R.F., Stat. de Biom., NANCY
- VEIHMEYER, HENDRICKSON, 1948 - Soil density and root penetration.
Soil Sci., 65, 487-493
- VESSEREAU A., 1960 - Méthodes statistiques en biologie et en agronomie.
538 p. Libr. Baillière et Fils, Paris
- VIGNERON J., DESAUNETTES J.R., 1960 - Relations entre quelques caractéristiques des sols.
7è Cong. intern. Soc. of Soil Sci., 1, 1-5, 114-121

- WAGENKNECHT E., 1960 - Beiträge zur Kenntnis der Wurzel Ausbildung verschiedener Bestockungen.
Mitt. St Forstverw Bayerns, (31), 252-274
- WHITE E.H., LEAF A.L., 1964 - Soil and tree potassium contents related to tree growth.
Soil Sci., 90, 395-402
- WIERSUM L.K., 1957 - The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots.
Plant and Soil, 9, 75-85
- WIERSUM L.K., 1961, - Utilisation of soil by the plant root system.
Pl. Soil., 15, 189-192
- WILDE S.A., 1961 - The Soil - ameliorating effect of Jack Pine (Pinus banksiana) and Red Pine (Pinus resinosa) plantations - Recent adv. in botany, Forest vég. and soils, 14, 1631-1635
- YEATMAN C.W., 1955 - Tree root development on Upland Heaths.
Forestry Commission n° 21, 50 p.
- ZÖTTL H., 1964 - Düngung und Feinwurzelverteilung im Fichtenbeständen.
Mitt. St Forstverw. Bayerns, 34, 333-342
- TCMASSONE R., 1965 - L'analyse des composantes principales.
11 p. C.N.R.F., Stat. de biom., NANCY

Nom de l'Etudiant : L E V Y Gérard
Nature de la Thèse : Docteur - Ingénieur

Vu, Approuvé et
Permis d'imprimer
Nancy, le 6/11/1967
Le Doyen,

J. AUBRY

